پژوهش نفت

PETROLEUM RESEARCH

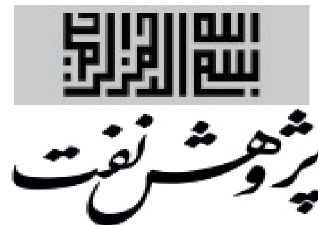
دوماهنامه علمی-پژوهشی/سال سی و دوم/شماره مسلسل ۱۲۶

آذر و دی ۱۴۰۱

Volume 32 \ Serial Number 126 \ ISSN 2345-2900

2023(December-January)

دوماهنامه علمی-پژوهشی، سال سی و دوم، شماره مسلسل ۱۲۶، آذر و دی ۱۴۰۱





دوماهنامه علمی- پژوهشی

سال سی و دوم، شماره ۱۲۶

آذر و دی ۱۴۰۱

آدرس:
تهران، بلوار غربی مجموعه ورزشی آزادی، پژوهشگاه صنعت نفت، دفتر مجله پژوهش نفت
صندوق پستی: ۱۳۷-۱۴۶۶۵
تلفن: ۴۸۲۵۲۱۲۹ و ۴۸۲۵۳۲۶۳ نمابر: ۴۴۷۳۹۷۱۲

وبگاه اینترنتی http://journals.ripi.ir

شماره پروانه انتشار: ۱۰۲/۷۹۹۲
ISSN ۲۳۴۵-۲۹۰۰

•مجله پژوهش نفت در پایگاه‌های زیر نمایه می‌شود:
•پایگاه استنادی علوم جهان اسلام (ISC)، (www.isc.gov.ir)
•اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی (www.sid.ir)
•بانک اطلاعات نشریات کشور (www.magiran.com)
• DOAJ: (www.doaj.org/)
•Chemical Abstracts Service (CAS): (www.cas.org)
•Indexcopernicus: (www. indexcopernicus.com)
•WorldCat: (www.worldcat.org)
•Leibniz Information Centre for Science and Technology (TIB): (www.tib.eu)

پژوهش نفت

دوماهنامه علمی- پژوهشی

سال سی و دوم، شماره ۱۲۶

آذر و دی ۱۴۰۱

فهرست عناوین

تخمین تراوایی و شبیه‌سازی آن به منظور تعیین ویژگی‌های مخزنی سازند شوریجه در یکی از مخازن شمال شرق ایران

میلاد مرادی[1]، حسین رحیم پور بناب[1] و علی کدخدائی[2]*

۱- دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، ایران

۲-گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۲۸

چکیده

تراوایی یکی از مهم‌ترین پارامترها در مخازن هیدروکربنی است. درک صحیح از مقدار تراوایی و نحوه توزیع و گسترش آن در فرآیند مدیریت تولید از میدان سودمند است. فرآیند مغزه‌گیری به‌دلیل محدودیت‌های که وجود دارد برروی تعداد کمی از چاه‌های میدان انجام می‌گیرد درحالی‌که بیشتر چاه‌ها تحت عملیات چاه‌نگاری قرار می‌گیرند. بنابرین یافتن راهی برای تخمین خصوصیات مخزن توسط نگاره‌های چاه‌پیمایی و مدل‌سازی آن در میدان تکنیک با ارزشی است. بنابراین در این پژوهش از روش شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چندلایه (پس انتشار خطا) برای تخمین تراوایی بخش‌های مختلف سازند شوریجه در حوضه رسوبی کپه داغ استفاده شده است. نمودارهای صوتی، نوترون و چگالی و نتایج حاصل از ارزیابی سازند شامل تخلخل و اشباع آب مفید به‌عنوان لایه ورودی و داده تراوایی حاصل از آنالیز مغزه دو چاه نیز به‌عنوان سلول‌های لایه خروجی برای آموزش شبکه مورد استفاده قرار گرفت. پس از آموزش شبکه با داده این دو چاه از داده آنالیز مغزه یک چاه دیگر برای آزمایش شبکه استفاده شد که در مرحله آزمایش شبکه ضریب هبستگی ۹۸٪ برای تراوایی به‌دست آمد. با استفاده از این شبکه عصبی، تراوایی برای چاه‌های دیگر میدان که فاقد داده مغزه بودند تخمین‌زده شد. بعد از تخمین تراوایی به‌کمک شبکه عصبی نحوه توزیع و گسترش آن به‌کمک الگوریتم مدل‌سازی گوسی متوالی (SGS) در مقیاس میدان مشخص گردید. طبق مدل به‌دست آمده نواحی ماسه‌سنگی که عمدتاً در زون‌های B و D هستند به‌عنوان نواحی مخزنی تفکیک شده‌اند و همچنین نواحی مرکزی و شمال غربی میدان به‌دلیل میانگین تراوایی بالاتر نواحی مستعد برای حفاری‌های بعدی میدان می‌باشند.

کلمات کلیدی: سازند شوریجه، کپه داغ، نگاره چاه‌پیمایی، شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چند لایه، شبیه‌سازی گوسی متوالی (SGS)

*مسؤول مکاتبات

آدرس الکترونیکی kadkhodaie_ali@tabrizu.ac.ir

شناسه دیجیتال: (DOI:10.22078/PR.2022.4660.3094)

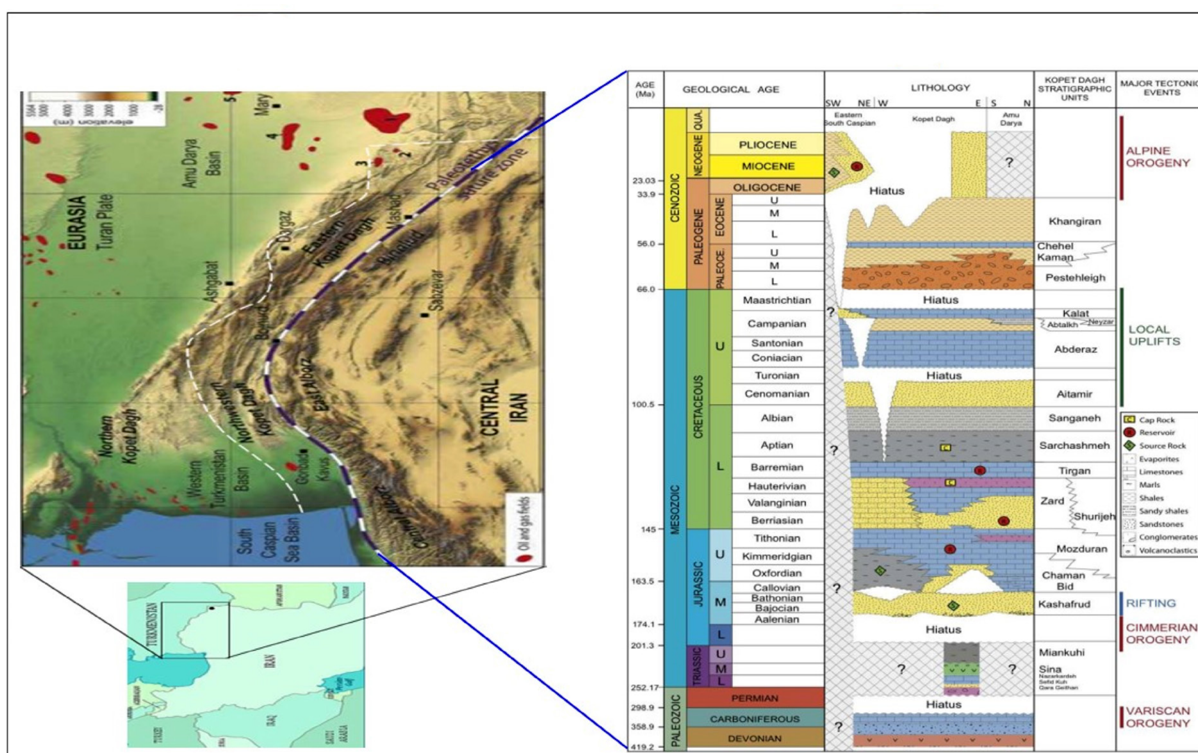
پژوهش نفت شماره ۱۲۶، آذر و دی ۱۴۰۱، صفحه ۱۸-۳

مقدمه

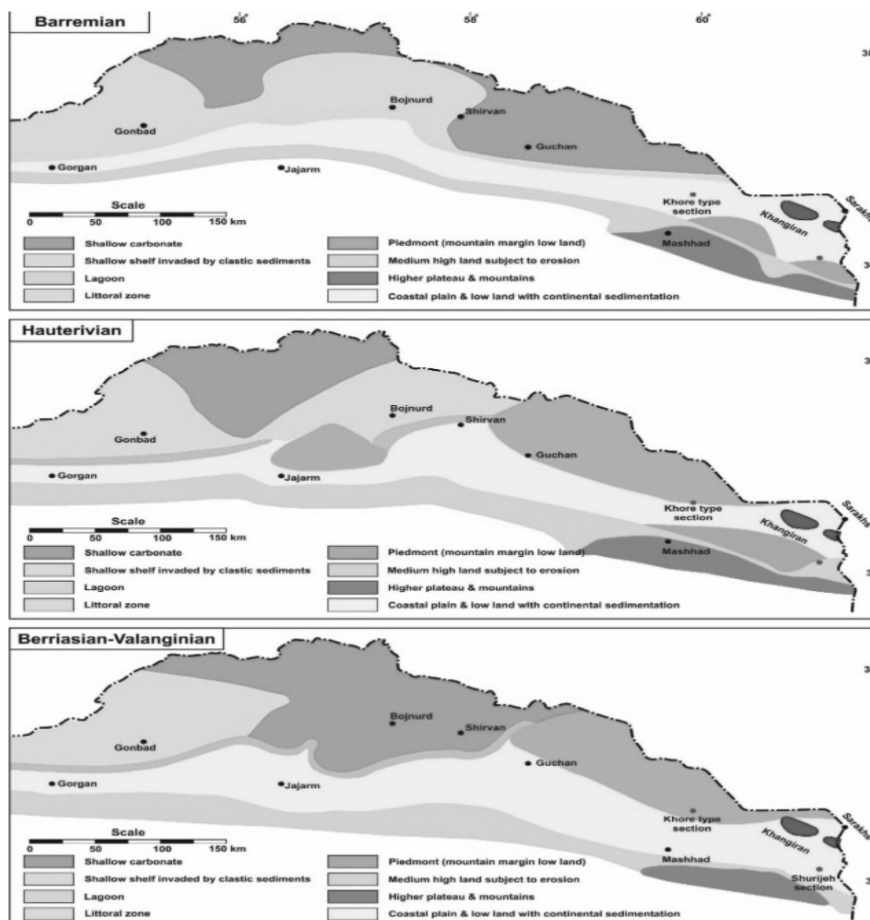
تخلخل و تراوایی از پارامترهای مهم سنگ مخزن هستند، که تخمین آنها نقش کلیدی در اکتشاف میادین هیدروکربنی و پیش‌بینی حفاری‌های بعدی در میدان را دارد. بنابراین با ارزیابی این پارامترها می‌توان عملکرد تولید مخزن را افزایش داد [۱].
برای تخمین تراوایی از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود اما تخمین آن با استفاده از مجموعه‌ای نگاره‌چاه‌پیمایی و به‌کمک شبکه عصبی مصنوعی به‌دلیل دقت بالا، هزینه کم (نسبت به فرآیند مغزه‌گیری) و سادگی در تخمین محبوبیت بیشتری دارد. در شبیه‌سازی تخمین دقیق تراوایی به‌دلیل فرآیند بازیافت ذخایر هیدروکربنی امری لازم و ضروری است [۲]. به‌طور معمول، پارامترهای مخزنی (مانند: تخلخل و تراوایی) را می‌توان از آنالیز مغزه به‌دست آورد. با توجه به‌دقت بالای که آنالیز مغزه‌گیری دارد اما به‌دلیل هزینه زیاد، محدودیت چاه‌های دارای داده مغزه و همچنین عدم پیوستگی در نرخ داده برداری نمی‌توان آن را به‌تنهایی در فرآیند شبیه‌سازی مورد استفاده قرار داد [۳]. اما داده‌های مربوط به نگاره‌چاه‌پیمایی به‌دلیل هزینه برداشت کمتر و پیوستگی در نرخ نمودارگیری و قابل دسترسی در اکثر یا تمام چاه‌های میدان در فرآیند تخمین تراوایی و شبیه‌سازی از اهمیت زیادی برخوردار است [۴ و ۵]. در سال‌های اخیر تخمین پارامترهای مخزنی و نگاره‌چاه‌پیمایی با استفاده از پاسخ مجموعه‌ای از نگاره‌های چاه‌پیمایی و با مدل شبکه عصبی مصنوعی توسط محققین در حال گسترش است [۶-۸]. شبکه عصبی مصنوعی و منطق فازی از جمله روش‌های تخمینی مبتنی بر یادگیری هستند [۹]. این روش‌ها یک ابزار محاسباتی قدرتمند در حل مسائل مبهم و پیچیده‌ای هستند که با استفاده از روش‌های ریاضی مانند روابط دیفرانسیلی یا همبستگی‌های خطی قابل حل نیست [۱۰]. هدف اصلی این مطالعه، تخمین تراوایی به‌عنوان مهم‌ترین پارامتر مخزنی به‌کمک شبکه عصبی مصنوعی و مدل‌سازی آن برای مشخص کردن نحوه گسترش و پراکندگی نواحی مستعد مخزنی در میدان است تا براساس نتایج این مدل زون‌های مخزنی از غیر مخزنی برای حفاری‌های بعدی در میدان تفکیک شوند.

زمین‌شناسی عمومی

از لحاظ سنگ‌شناسی، سازند شوریجه در بخش شرق مشهد و شمال‌غرب و غرب مشهد تغییرات قابل توجهی دارد (شکل ۱). بر طبق نقشه‌های رخساره‌ای شکل ۲، رخساره‌های کنگلومرایی و ماسه‌ای با میان لایه‌های شیل سرخ عمدتاً در بخش غربی ظهور می‌یابند درحالی‌که در بخش شمال‌غرب و غرب مشهد رخساره‌های شیلی، ژیپسی، ماسه سنگی با میان لایه‌های کربناتی افزایش ضخامت می‌یابند [۱۱]. بازسازی محیط رسوبی این سازند براساس رخساره‌های رسوبی نشان می‌دهد که این سازند نتیجه رسوب‌گذاری در نواحی خشکی طی یک فاز پسروی دریایی در کرتاسه پیشین (نئوکومین) است (شکل ۲). رسوبات این فاز عمدتاً از سنگ‌های آواری ژوراسیک جنوب مشهد تأمین شده است [۱۲]. رسوب‌گذاری سازند آواری شوریجه در حوضهٔ کپه داغ در زمان رخداد خشکی‌زایی سیمرین پسین همزمان با پسروی گستردهٔ آب دریا در اواخر ژوراسیک- اوایل کرتاسه در اثر برخورد حوضه‌های ایران مرکزی و هلمند با حوضه‌های کپه داغ و آمودریا آغاز گردیده است [۱۳-۱۵]. به‌نظر می‌رسد توالی سازند شوریجه در نواحی شرقی و جنوبی حوضهٔ رسوبی کپه داغ در بخش زیرین مربوط به محیط رودخانه‌ای و در بخش بالایی عمدتاً در یک محیط دلتایی تا دریایی کم‌عمق رسوب‌گذاری کرده است [۱۶-۱۸]. همچنین، محیط رسوبی قسمت زیرین سازند شوریجه در شرقی‌ترین بخش حوضهٔ کپه داغ عمدتاً از نوع رودخانهٔ بریده بریده و گاهی اوقات مئاندری است.



شکل ۱ الف) محل میدان‌های گازی (منطقه قرمز)؛ میادین عظیم گاز: ۱: دولت‌آباد، ۲: گنبدلی، ۳: خانگیران، ۴: شالتیک، ۵: بایرام علی، خط تیره سفید: مرز کشور؛ و ب) ستون چینه‌شناسی حوضه رسوبی کپه داغ [۲۰].



شکل ۲ نقشه جغرافیای دیرینه کپه داغ در کرتاسه پیشین [۲۱]

که به‌سمت قسمت بالایی این سازند تبدیل به رخساره‌های ساحلی و در نهایت رخساره‌های پهنۀ جزر و مدی می‌گردد. این قسمت به‌سمت غرب حوضه به‌طور جانبی به بخش‌های زیرین سازند تیرگان تبدیل می‌شود [۱۲]. بر طبق مطالعات پیشین، این سازند به پنج واحد مخزنی تقسیم شده است که زون‌های ماسه‌ای B و D اصلی‌ترین زون‌های مخزنی بوده و زون‌های A، C، E عموماً دارای خواص مخزنی مناسبی نمی‌باشند [۱۹].

داده‌ها و روش مطالعه

در این مطالعه برای تخمین و مدل‌سازی تراوایی در میدان مورد مطالعه، داده هفت حلقه چاه مورد بررسی قرار گرفت. تمام چاه‌های مطالعه‌ای دارای داده نگاره چاه‌پیمایی هستند ولی تنها از سه حلقه چاه داده آنالیز مغزه در دسترس است. در این پژوهش در ابتدا برای تخمین تراوایی، ارتباط هر کدام از نگاره‌های چاه‌پیمایی با تراوایی و براساس ضریب همبستگی مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت، نگاره‌های نوترون، چگالی و صوتی و تخلخل مفید و اشباع آب حاصل از ارزیابی سازند با داشتن بهترین ضریب همبستگی و ارتباط بالا با تراوایی برای ساخت مدل شبکه عصبی پرسپترون چند لایه انتخاب گردید. بعد از اطمینان از عملکرد و مقدار دقت شبکه عصبی در چاه آزمایش، برای چاه‌های فاقد داده مغزه تراوایی تخمین‌زده شد. در ادامه برای شبیه‌سازی تراوایی و مشخص کردن گسترش و پراکندگی زون‌های مخزنی از غیرمخزنی و نواحی مستعد برای حفاری‌های بعد در میدان مراحل زیر در نرم‌افزار پترل انجام شد: ۱- بارگذاری پارامترهای ورودی (مانند: ورود اطلاعات سربرگ[1] و موقعیت چاه‌ها، سرسازندها[2]، اطلاعات نقشه‌های افق هم تراز دیجیتال[3]، نمودارهای چاه‌پیمایی[4]) و کنترل کیفیت آن، ۲- مدل‌سازی ساختمانی[5]، ۳- مدل‌سازی خواص پتروفیزیکی (تراوایی). برای مدل‌سازی پارامتر مخزنی (تراوایی) از دو الگوریتم گوسی متوالی و کریجینگ[6] استفاده شده است [۲۲ و ۲۳].

نتایج

شبکه عصبی مصنوعی

شبکه عصبی مصنوعی، یک شبکه به هم پیوسته‌ای از پردازنده اطلاعات است که مشابه سیستم عصبی مغز انسان عمل می‌کند. یک شبکه عصبی از واحدهای پردازنده به نام نرون و اتصالات بین واحدی که همان ضرایب یا فاکتورهای وزنی تشکیل شده است. نرون‌ها عناصر ضروری شبکه عصبی هستند و شبیه نرون بیولوژیکی، به‌صورت هماهنگ با هم در ارتباط هستند. در یک نگاه کلی، مدل یک شبکه عصبی شامل مجموعه‌ای از ورودی‌ها است که در نقش سناپس عمل می‌کنند و یک تابع فعال‌سازی تصمیم می‌گیرد که چگونه نرون فعال شود یا نه و مقدار خروجی براساس آن مشخص می‌شود. یکی از سادترین و پرکاربردترین شبکه‌های عصبی، مدل پرسپترون چندلایه است و شامل یک لایه ورودی، یک یا چند لایه پنهان و یک لایه خروجی است [۲۴]. خروجی شبکه عصبی (در لایه آخر) را می‌توان براساس رابطه ۱ محاسبه کرد:

$$O = f(net), net = b + w_1 x_1 + .. + w_n x_i = b + \sum wnxi \quad (1)$$

در این رابطه، ω و b وزن و بایاس شبکه عصبی مصنوعی بوده و f نشان‌دهنده تابع فعال‌سازی است که شامل یک فرمول ریاضی برای بروزرسانی وزن‌ها در شبکه است.

آموزش شبکه عصبی

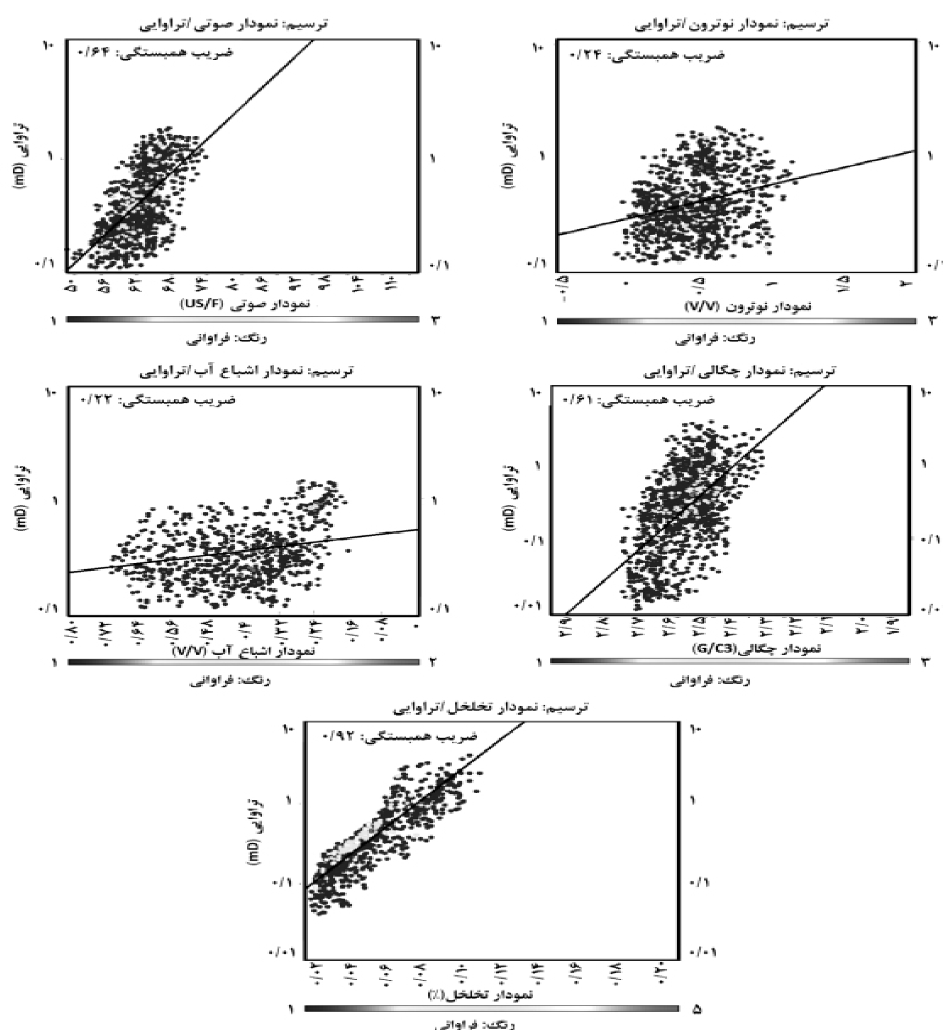
الگوریتم‌های زیادی برای آموزش شبکه عصبی وجود دارد.

1. Well Head
2. Well Top
3. Underground Contour Map
4. Well Log
5. Structural Modeling
6. Kriging

اما در این مطالعه به‌دلیل کاربرد و محبوبیت بیشتر الگوریتم پس‌انتشار خطا[1] از آن برای آموزش استفاده شده است. این روش جزو روش‌های با نظارت[2] است که داده‌های ورودی مشخص شده‌اند و خروجی مورد انتظار هر یک از آن‌ها از پیش مشخص است. بنابراین تخمین خروجی شبکه (تراوایی تخمینی) با تخمین ایده‌آل (تراوایی مغزه) مقایسه شده و خطای شبکه با استفاده از الگوریتم‌های مختلف محاسبه می‌شود. در هر مرحله، خروجی شبکه اندازه‌گیری می‌شود و برحسب میزان خطا بین پارامتر تخمینی و پارامتر هدف، وزن‌ها تصحیح می‌گردند تا در نهایت این خطا به حداقل برسد [۲۵].

انتخاب ورودی‌های مدل شبکه عصبی

این گام از کار نقش مهمی را در ساخت مدل ایفا می‌کند. به‌طور کلی، ارتباط قوی بین داده‌های ورودی و خروجی، می‌تواند پیش‌گویی دقیق‌تری را نسبت به داده‌های با تطابق ضعیف‌تر ایجاد کند. در این مطالعه با کراس پلات‌های مختلف نگاره‌های چاه‌پیمایی در مقابل تراوایی انجام شده و نگاره‌های نوترون (NPHI)، صوتی (DT) و چگالی (RHOB) دارای بیشترین ارتباط با خروجی (تراوایی حاصل از آنالیز مغزه) بود، و برای بهبود تخمین تراوایی، تخلخل مؤثر (PHIE) و اشباع آب مؤثر (SWE) حاصل از ارزیابی احتمالی سازند هم به‌عنوان ورودی شبکه انتخاب شد (شکل ۳).



شکل ۳ ترسیم پارامترهای ورودی و هدف برای ساخت شبکه عصبی

1. Error Back Propagation
2. Supervised

پژوهش نفت شماره ۱۲۶، آذر و دی ۱۴۰۱، صفحه ۱۸-۳

طراحی ساختار شبکه عصبی مصنوعی

کارآیی شبکه‌های آموزش دیده تا حدی با استفاده از خطای مجموعه‌های آموزشی، اعتبارسنجی و آزمایش قابل اندازه‌گیری است، اما اغلب بهتر است تا جزئیات عکس‌العمل شبکه با دقت بیشتری بررسی گردد. آنالیز همبستگی برای انجام این تحلیل‌ها طراحی شده است، برای انجام این آنالیز خروجی شبکه و بردار هدف- برای داده‌های آموزش، اعتبارسنجی و آزمایش- وارد نرم‌افزار اکسل شده و آنالیز همبستگی آن برای مشخص کردن m و b (شیب و عرض از مبدأ) انجام گرفت. اگر تناسب کاملی بین خروجی و هدف وجود داشته باشد (یعنی خروجی شبکه کاملاً با هدف برابر باشد)، شیب برابر یک و عرض از مبدأ برابر صفر خواهد بود. پارامتر دیگر آنالیز همبستگی، ضریب همبستگی بین خروجی‌ها و هدف است. که اگر این عدد برابر یک باشد، در آن صورت مشخص می‌شود که ارتباط کاملی بین خروجی و هدف وجود دارد. برای ارزیابی شبکه بهینه از جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین مربعات خطا (MSE) نیز استفاده گردید (رابطه ۲ و ۳):

$$RMSE=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} ei^{2}}{n}} \quad (۲)$$

$$MSE=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(ei)^{2} \quad (۳)$$

که در آن n تعداد داده‌ها و e اختلاف بین مقدار واقعی و مقدار برآورد شده توسط شبکه است. پس از انجام مراحل بهینه‌سازی مشخص گردید که شبکه‌ای با مشخصات زیر می‌تواند بهترین نتایج را در پیش‌بینی مسئله مورد نظر به‌همراه داشته باشد:

۱- شبکه سه لایه با دو لایه مخفی

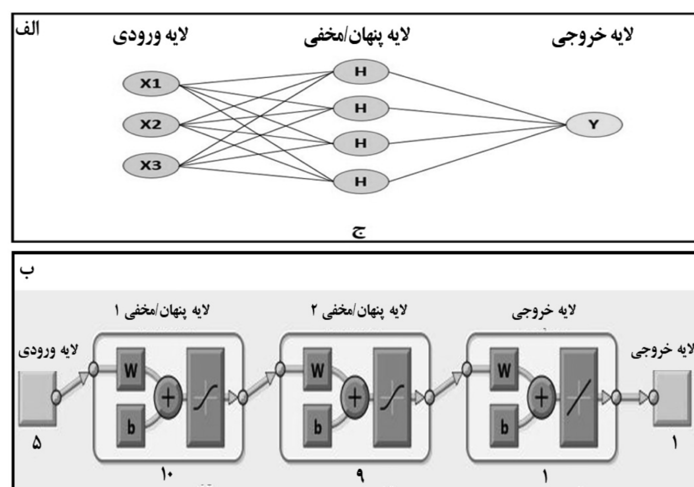
۲- تابع tansig به‌عنوان تابع انتقال لایه مخفی

۳- تابع pureline به‌عنوان تابع انتقال لایه خروجی

۴- ۱۰نرون در لایه مخفی اول و ۹ نرون در لایه مخفی دوم

۵- تابع trainlm به‌عنوان تابع آموزش شبکه

شکل ۴ ساختار کلی شبکه بهینه ایجاد شده را نمایش می‌دهد. در نهایت، شبکه‌ای با مشخصات فوق ساخته شد و توسط آن تراوایی مخزن تخمین‌زده شد. عملیات تخمین ۲۱ مرتبه تکرار گردید. یکی از معیارهای مهم در آموزش شبکه، تعداد دوره‌ها یا تکرارهایی است که شبکه در حین آموزش انجام می‌دهد. تعیین صحیح این تکرارها در آموزش شبکه بسیار مهم است. به‌طور کلی هر چه تعداد تکرارها در آموزش شبکه بیشتر باشد خطای پیش‌بینی در شبکه کمتر می‌شود.اما هنگامی‌که تعداد تکرارها از یک مقدار تجاوز کند، خطای دسته آزمایشی نیز افزایش می‌یابد.

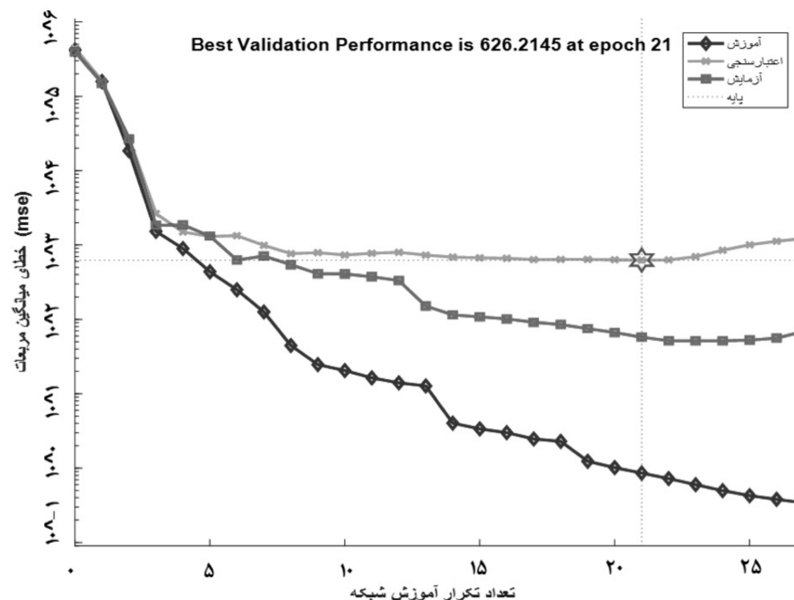


شکل ۴ الف) ساختار شبکه عصبی پرسپترون سه لایه؛ ب) ساختار کلی شبکه عصبی استفاده شده در این مطالعه [۲۵]

همان‌طوری که در شکل ۵ دیده می‌شود از تکرار ۲۱ به بعد که خطای آزمایش افزایش پیدا می‌کند و آموزش شبکه متوقف و وزن‌های شبکه ثابت می‌گردد تا بیش از حد آموزش نبیند و الگوها را حفظ کند. در جدول ۱ میانگین پارامترهای حاصل از آنالیز همبستگی، تعداد داده هر دسته و خطای مربعات حاصل از ۲۱ تکرار برای هر سه نوع داده آموزش، اعتبارسنجی و آزمایش مشاهده می‌شود. نتایج گرافیکی مربوط به مقایسه تراوایی حاصل از مغزه و تخمینی در مقابل هر سه نوع دسته آموزش، اعتبارسنجی و آزمایش در شکل‌های ۶ تا ۸ و مقایسه نتایج تخمینی با داده واقعی تراوایی در مقابل عمق در شکل‌های ۹ و ۱۰ ترسیم شده است.

مدل‌سازی زمین آماری

زمین آمار علمی است که به بحث در مورد رابطه فضایی بین متغیرها می‌پردازد. در طبیعت مشخص شده است که مقدار و میزان یک پارامتر در فواصل نزدیک مشابه به هم و با افزایش فاصله مقدار شباهت بین آنها کاهش پیدا می‌کند. بنابراین، زمین‌آمار با بررسی پارامترهای مؤثر بین اندازه‌گیری‌ها به توزیع فضایی یک متغیر می‌پردازد [۲۶]. در زمین آمار از الگوریتم‌های مختلفی برای شبیه‌سازی استفاده می‌شود. در مدلسازی پتروفیزیکی، رخساره‌ای و ساخت افق‌های زمین‌شناسی باید نوع الگوریتمی که استفاده می‌شود مشخص و هم راستا با نوع ورودی داده‌ها باشد. دو نوع روش زمین آماری وجود دارد، یک دسته تحت عنوان روش‌های قطعی (مانند: کریجینگ و میانگین جریان[1]) و دسته دوم، روش‌های تصادفی (شاخص پی‌درپی و گوسی متوالی) شناخته می‌شوند.

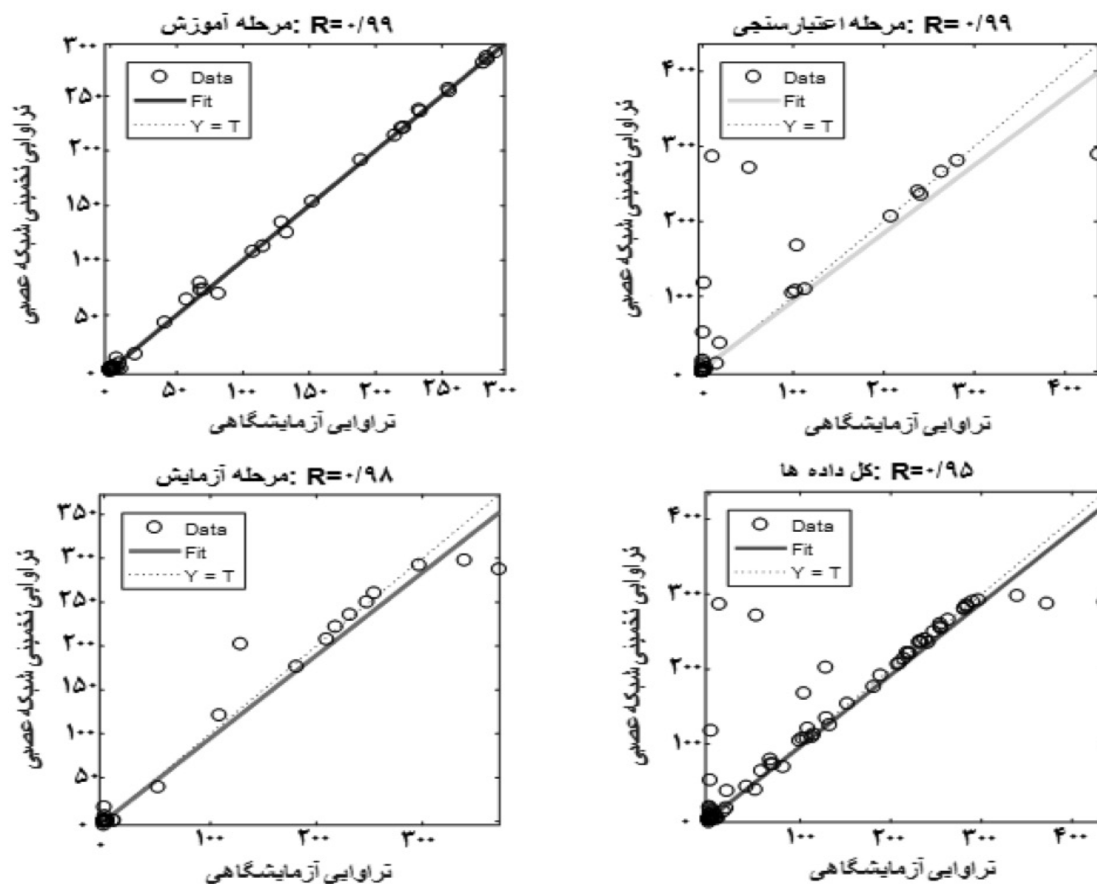


شکل ۵ منحنی خطا در مقابل تعداد تکرار الگوریتم برای داده‌های آموزش، اعتبارسنجی و آزمایش

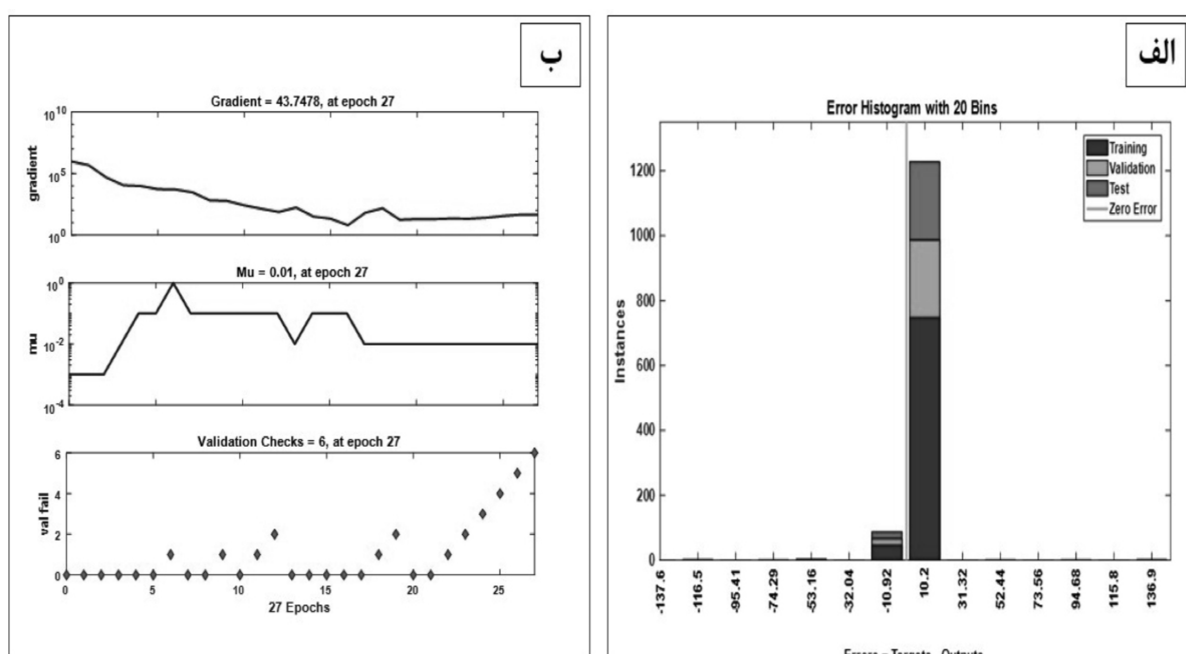
جدول ۱ میانگین پارامترهای حاصل از آنالیز همبستگی و مقدار خطا برای انواع مختلف داده‌ها

نوع داده	تعداد داده	شیب نمودار همبستگی	عرض از مبدأ	ضریب همبستگی	RMSE	MSE
آموزش	۷۹۴	۰/۹۹	۰/۰۰۷	۰/۹۹	۰/۹۲	۰/۰۱
اعتبارسنجی	۲۶۴	۰/۹۷	۳/۱	۰/۸۵	۲۵/۰	۲/۳
آزمایش	۲۶۴	۰/۸۶	۰/۳۴	۰/۹۸	۷/۵	۰/۲۲

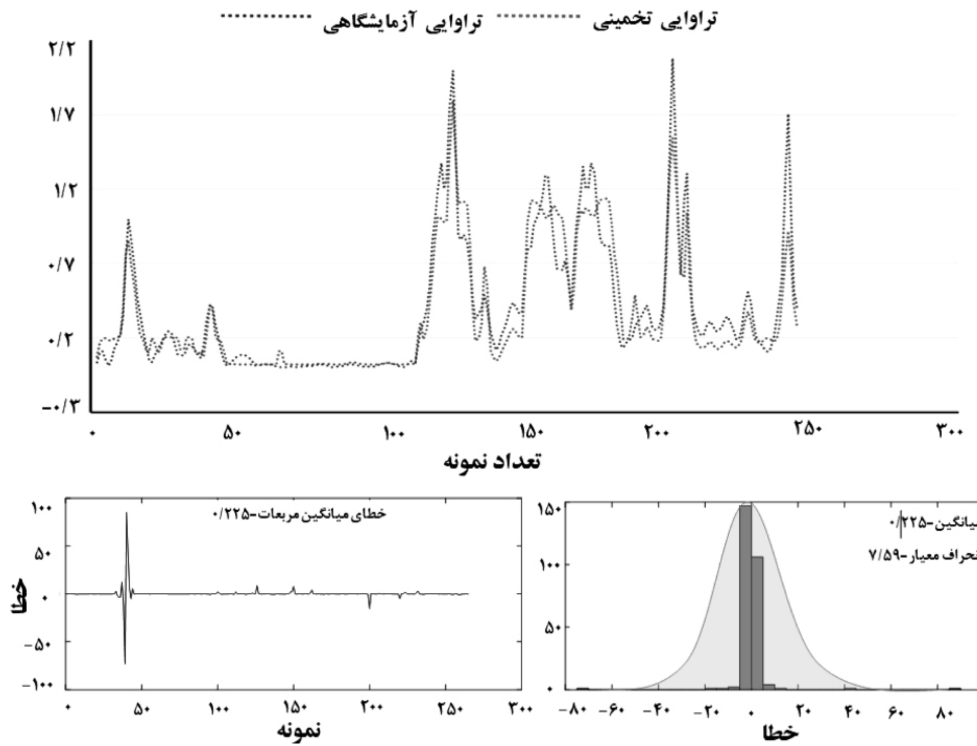
1. Moving Average



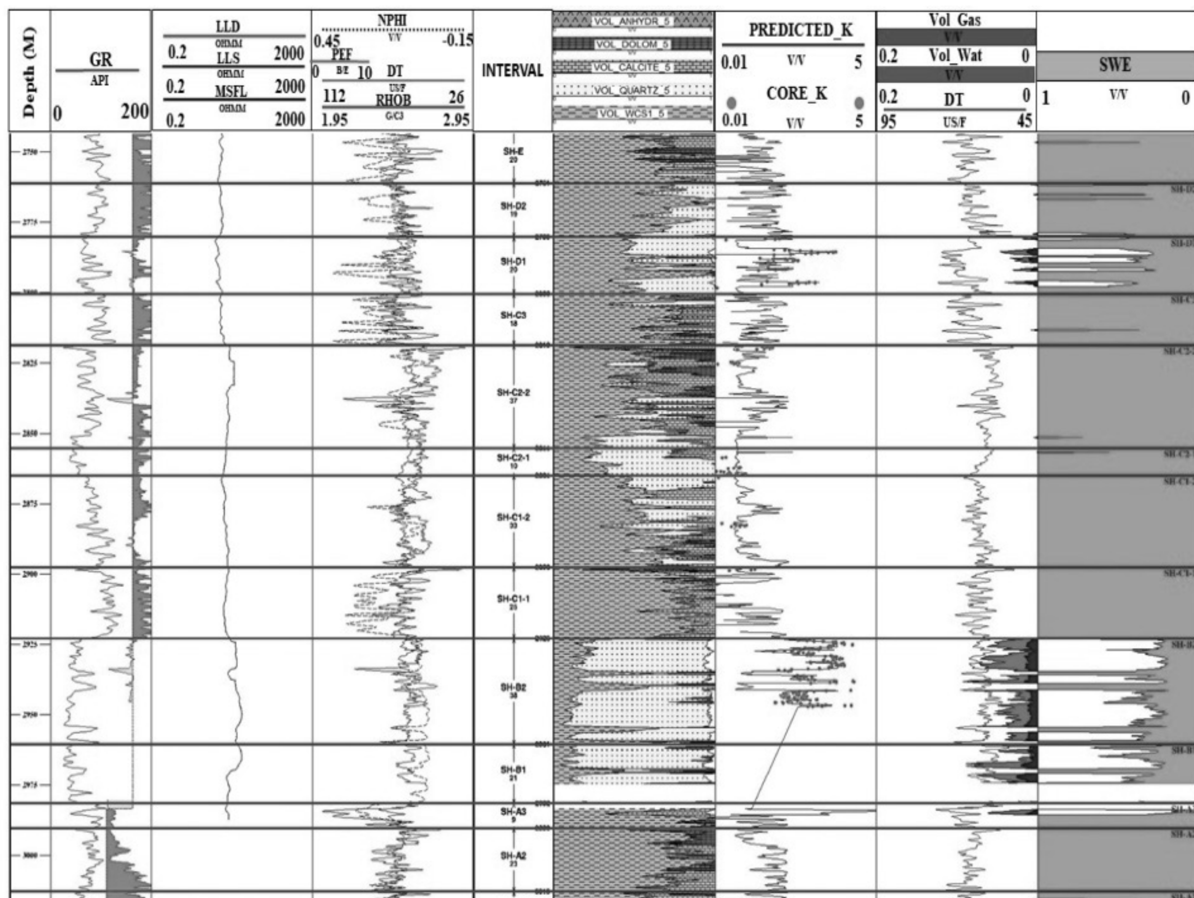
شکل ۶ مقایسه تراوایی آزمایشگاهی (Real) و مقادیر تخمین‌زده شده (Predicted) برای داده‌های آموزش، اعتبارسنجی و آزمایش.



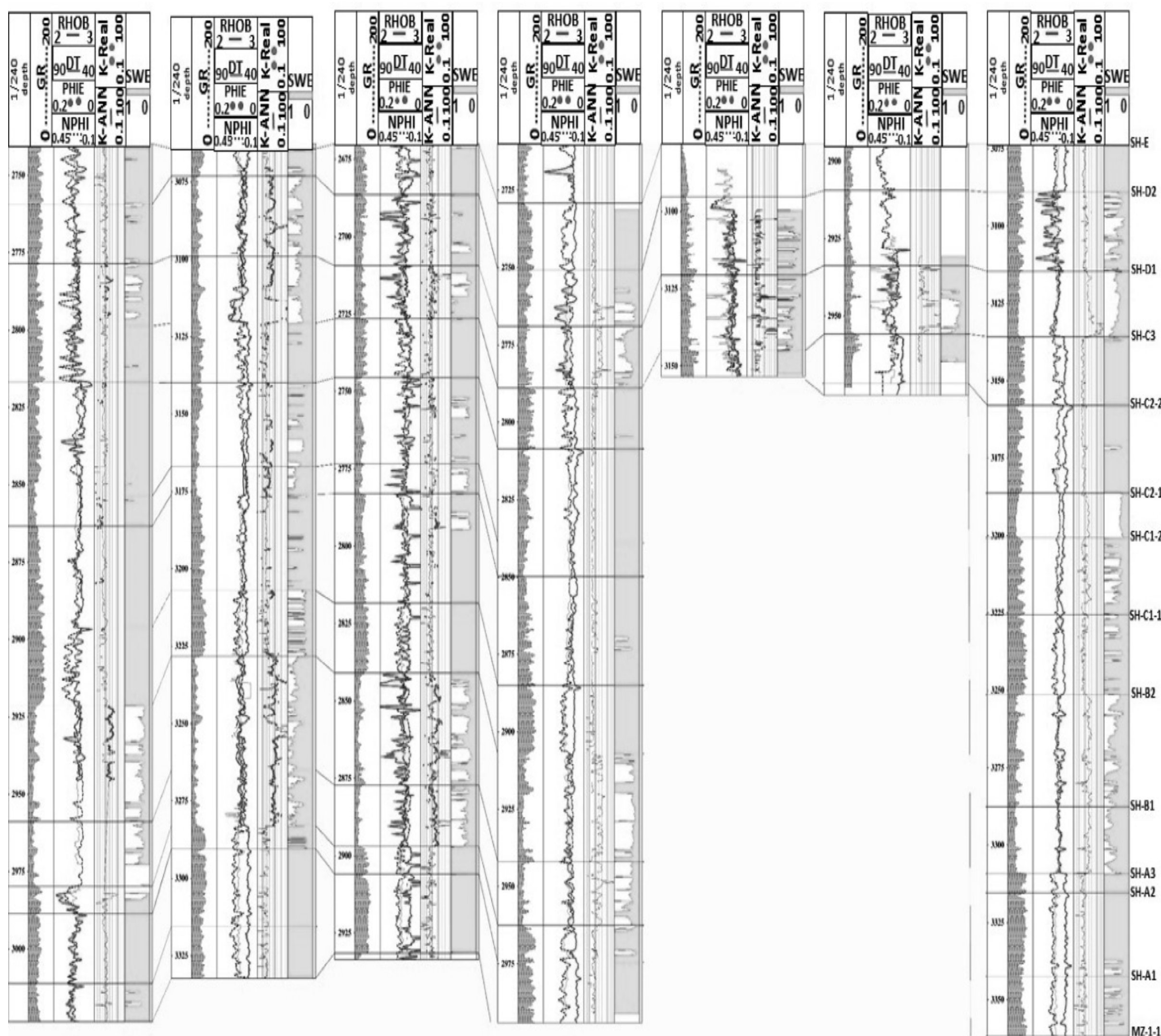
شکل ۷ الف) هیستوگرام خطا برای دادهای آموزش، اعتبارسنجی و آزمایش، ب) تعداد تکرار آموزش شبکه.



شکل ۸ مقایسه تراوایی مغزه اندازه‌گیری (Real) و مقادیر تخمین‌زده شده (Predicted) در چاه آزمایش (KG-001)



شکل ۹ نمایش ورودی‌های ساخت شبکه عصبی و مقایسه تراوایی مغزه اندازه‌گیری (Real) و مقادیر تخمین‌زده شده (Predicted) در مقابل عمق چاه آزمایش (KG-001)



شکل ۱۰ نمایش ورودی‌های ساخت شبکه عصبی با مقادیر تخمین‌زده شده (ANN) برای هر هفت چاه مورد مطالعه

در روش قطعی، براساس نقاط داده مشخص، مقادیر جدیدی برای نقاط دیگر در همان محدوده محاسبه می‌کند. در این روش برحسب مقدار فاصله نقاط مجهول از نقطه معلوم وزن دهی داده می‌شود. در روش تصادفی با هر بار اجرا برروی یک سری داده ثابت، جواب‌های مختلفی به‌دست می‌آید که البته احتمال وقوع آنها با هم برابر است. در روش تصادفی جواب‌های تصادفی تولید می‌شود و در ادامه می‌توان چندین مدل احتمالی رو با هم مقایسه کرد و محتمل‌ترین مدل که با تعداد بیشتری تولید شده است را به‌عنوان بهترین مدل در نظر گرفت [۲۷]. بسته به نوع داده‌ای که برای مدل‌سازی انتخاب می‌شود دو نوع مدل احتمالی، شاخص پی‌درپی و گوسی متوالی نسبت به دیگر روش‌های احتمالی محبوبیت بیشتری دارند. اگر داده‌ها به‌صورت گسسته و اعداد صحیح (مانند کد رخساره‌ای یا گونه‌های سنگی و..) باشند از مدل شبیه‌سازی احتمالی شاخص پی‌درپی استفاده می‌شود و اگر داده‌ها به‌صورت پیوسته و اعشاری (مانند پارمترهای پتروفیزیکی) باشد از مدل شبیه‌سازی احتمالی گوسی متوالی استفاده می‌شود.

مدل کریجینگ: یکی از مشهورترین الگوریتم‌ها برای شبیه‌سازی پارامترهای، ایستای مخزن هستند و براساس رابطه درون‌یابی خطی بنا شده است. در این روش با استفاده از یک رابطه خطی رابطه ۴ نقاط مجهول براساس نقاط معلوم تخمین‌زده می‌شود [۲۷ و ۲۸].

$(\lambda_i Z(x_i))Z(x_0)=E_i^N=1$ (۴)

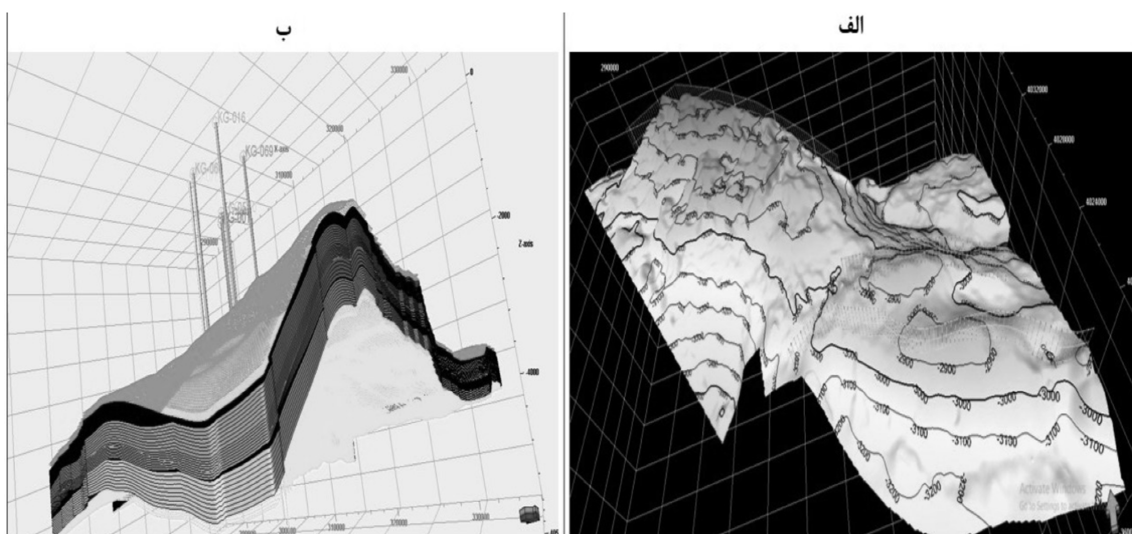
در این رابطه، $Z(X_0)$ پارامتر مجهول در نقطه X_0، λ_i وزن هر نقطه و $Z(X_i)$ مقدار پارامتر معلوم در نقطه X_i است. مدل گوسی متوالی: در این روش برای تخمین یک نقطه مجهول از تکرار فرآیندهای آماری استفاده می‌شود و توزیع داده‌ها از یک نمودار گوسی پیروی می‌کند. در الگوریتم به‌کار رفته در این روش ابتدا کاملاً به‌صورت تصادفی یک نقطه انتخاب می‌شود و سپس کل سلول‌های شبکه به‌ترتیب و به شکل متوالی شبیه‌سازی می‌شود [۲۹]. در ساخت یک مدل زمین‌آماری مراحل زیر به‌ترتیب انجام می‌شود:

ساخت مدل ساختمانی[1] و شبکه‌بندی[2] مخزن

چهارچوب هندسی شبکه سه بعدی، مدل ساختمانی مخزن است. به‌طور کلی، مدل ساختمانی نقطه شروع یک مدل مخزن است [۳۰]. در این مطالعه با توجه به افق‌های مربوط به سازندها و گسل‌های مربوطه مدل ساختمانی تعریف گردید (شکل ۱۱). بعد از تعریف مدل ساختمانی باید این مدل یکپارچه مخزن به سلول‌های کوچکتری که در برگیرندی میانگین هر پارامتر هستند تقسیم شوند. هر چقدر این سلول‌ها کوچک مقیاس‌تر انتخاب شود دقت مدل‌سازی بالاتر، اما مدت زمان ساخت مدل بیشتر می‌شود. بنابراین باید انتخاب این سلول‌ها بدرستی انجام شود تا تخمین درستی از میدان به‌دست آید. از این‌رو، تعریف شبکه‌بندی مناسب برای شبیه‌سازی و تخمین صحیح هر پارامتر مخزنی ضروری است [۳۱]. در این مطالعه با توجه به اهمیت مخزنی هر کدام از زون‌های سازند شوریجه، اقدام به شبکه‌بندی مخزن شد. بنابراین بعد از تعریف مدل ساختمانی در راستای X و Y ۱۰۰ × ۱۰۰ مترمربع و در راستایی Z در زون مخزنی (D1، C2، B و D2) ۱ متر و غیرمخزنی (C3، C1، A و E) ۵ m^2 شبکه‌بندی انجام شد (شکل ۱۱).

درشت‌نمایی[3]

با توجه به اینکه داده هر پارامتر مخزنی و نگاره‌چاه‌پیمایی در مسیر چاه حفاری شده است باید قبل از شبیه‌سازی این پارامترها در تمام ابعاد سلول ساختمانی تعریف شود که این مرحله درشت‌نمایی نامیده می‌شود. برای درشت نمایی از روش‌های مختلف میانگین‌گیری استفاده می‌شود [۳۲].



شکل ۱۱ الف) افق مربوط به سرسازند و اثر گسل، ب) شبکه‌بندی سازند شوریجه

1. Structural Modeling
2. Pillar Gridding
3. Upscaling

معمولاً سه روش میانگین‌گیری شامل میانگین‌گیری حسابی، هندسی و همساز[1] وجود دارد. روش حسابی به‌دلیل اینکه داده‌ها با تصاعد حسابی در ارتباط هستند، هر داده با نقطه وسط داده‌ها (میانه) برابر است یا به عبارت دیگر میانگین حسابی، نقطه ای است که میانگین فاصله نقاط از آن صفر است. در روش هندسی، تصاعد هندسی یا جزر آن با نقطه وسط داده یا همان میانه برابر خواهد بود. روش سوم میانگین‌گیری روش میانگین همساز است که دقیقاً برعکس میانگین‌گیری حسابی تعریف می‌شود و معکوس داده‌ها در نظر گرفته می‌شود. بنابراین با توجه به اینکه پارامترهای مخزنی مانند تراوایی، تخلخل و غیره، اعداد پیوسته و به‌صورت اعشار می‌باشند استفاده از روش میانگین‌گیری حسابی نتایج بهتری حاصل می‌شود. میانگین‌گیری حسابی با استفاده از رابطه ۵ قابل محاسبه است:

$$XA = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} Xi = \frac{1}{n}(X1 + \ldots + Xn) \quad (۵)$$

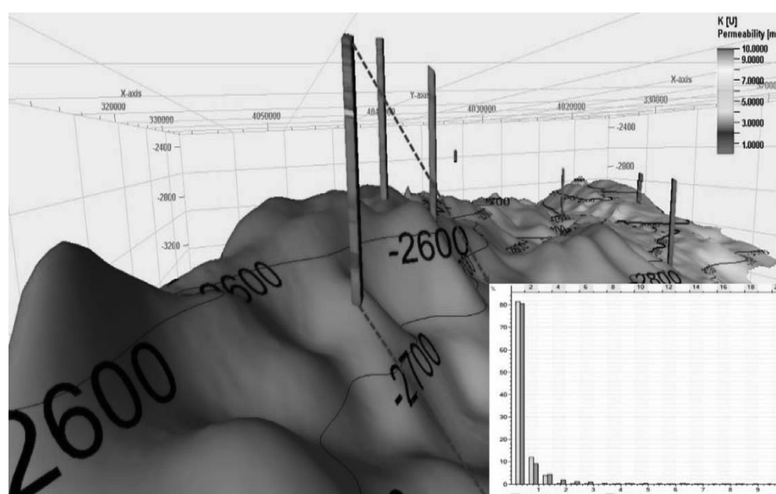
که در این رابطه، XA میانگین پارامترهای پتروفیزیکی Xi، X مقادیر پارامتر X در موقعیت i و h تعداد نمونه‌ها است. درشت نمایی برای پارامترهای پتروفیزیکی (تراوایی) برای زون‌های مورد مطالعه در شکل ۱۲ نمایش داده شده است که با توجه به شکل تخمین خوبی را برای کل سلول‌های ساختمانی نشان می‌دهد.

آنالیز داده

بعد از درشت نمایی در محاسبات زمین‌آماری اول باید داده دارای توزیع نرمال باشد و در ادامه، اثر روند در آنها حذف شود. در زمین‌آمار موقعیت فضایی داده‌ها و مقدار کمیت آن همزمان بررسی می‌شود. پس باید بین مقادیر یک کمیت در جامعه نمونه، فاصله و جهت قرارگیری داده‌ها نسبت به هم ارتباط برقرار شود. این ارتباط توسط ساختار فضایی برقرار می‌شود [۳۱]، که این ساختار همان واریوگرام[2] در فرآیند شبیه‌سازی است،که در سه جهت عمود، اصلی و فرعی تعریف می‌گردد. انتخاب صحیح واریوگرام در فرآیند مدل‌سازی سه بعدی پارامترهای پتروفیزیکی (تراوایی) اهمیت زیادی دارد [۲۲، ۲۶،۳۳]. مقدار واریوگرام از رابطه ۶ محاسبه می‌گردد:

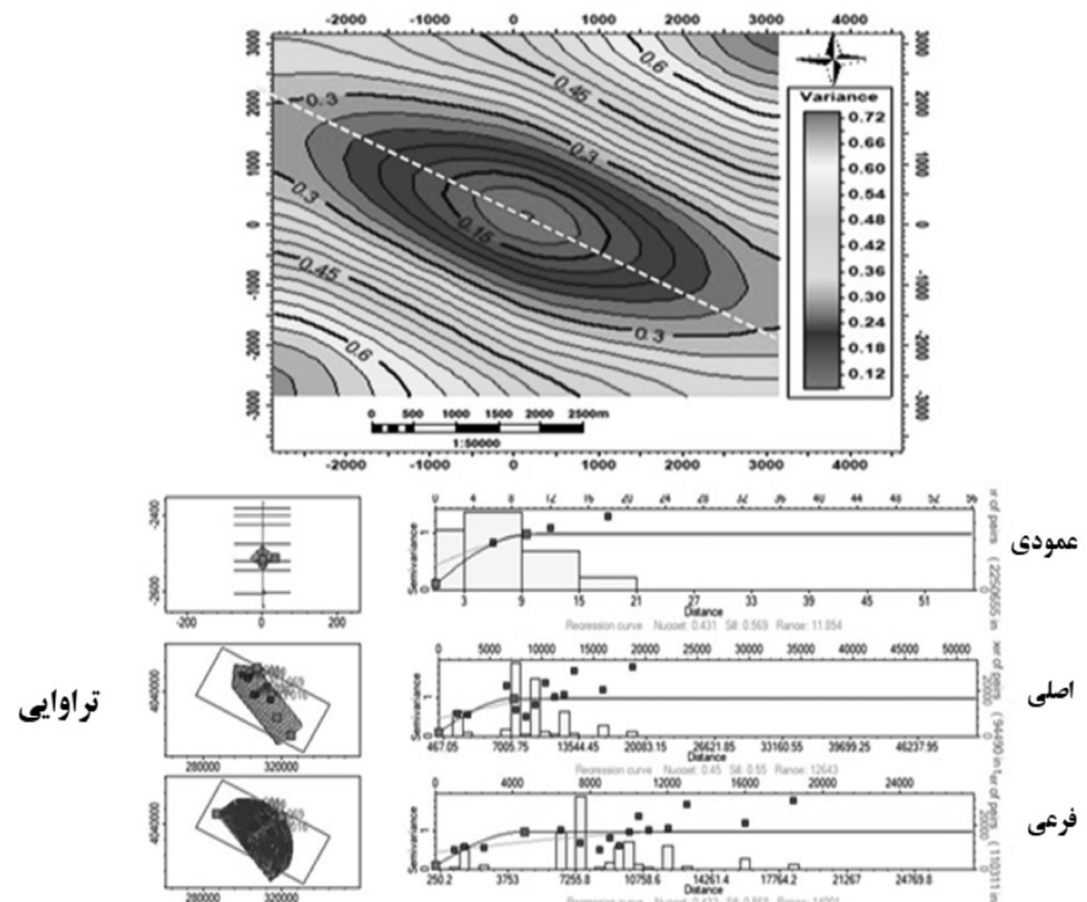
$$Y(h) = \frac{1}{2N_h}\sum_{i=1}^{N_h}(Z_{x+h} - Z_x)^2 \quad (۶)$$

که در این رابطه، N_h تعداد جفت نمونه‌های به‌کار رفته شده به‌ازای یک فاصله مشخص مانند h ، Z_x متغیر مشاهده شده در نقطه x و Z_{x+h} مقدار متغیرهای مشاهده شده در نقطه‌ای به فاصله h از نقطه x است (شکل ۱۳).



شکل ۱۲ درشت‌نمایی داده تراوایی

1. Harmonic Mean
2. Variogram



شکل ۱۳ مدل واریوگرام در سه جهت عمودی، اصلی و فرعی زون D1 سازند شوریجه

تفسیر نتایج

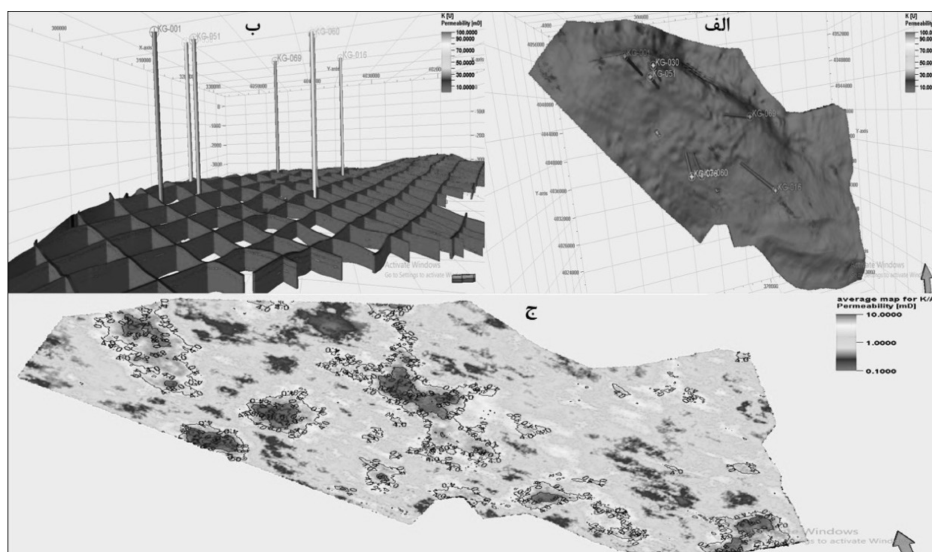
تخمین صحیح تراوایی و مشخص کردن نحوی توزیع و گسترش این پارامتر به‌دلیل هزینه زیاد مغزه‌گیری و عدم پیوستگی آن در چاه‌های حفاری یکی از اهداف اصلی در هر پروژه نفتی است. شبکه عصبی پرسپترون چند لایه (MLP) به‌دلیل دقت بالایی که در فرآیند تخمین دارد مورد استفاده قرار گرفت. بعد از ترسیم انواع نگاره‌های‌چاه‌پیمایی با تراوایی، براساس ضریب رگرسیون، نگاره‌های که بیشترین ضریب همبستگی را با تراوایی داشتند انتخاب گردید. نگاره‌های‌چاه‌پیمایی نوترون، صوتی و چگالی و نتایج حاصل از ارزیابی سازند شامل تخلخل مفید و اشباع آب مؤثر به‌عنوان ورودی‌های شبکه عصبی مصنوعی انتخاب شده‌اند. بعد از مقایسه الگوریتم‌های مختلفی که برای آموزش شبکه وجود دارد الگوریتم trainlm با کمترین میانگین مربعات خطا (MSE) برای هر سه دسته آموزش، اعتبارسنجی و آزمایش به‌عنوان روش بهینه انتخاب گردید. برای انتقال لایه مخفی از تابع tansig و برای لایه خروجی از تابع pureline استفاده شد. همان‌طوری که در شکل‌های ۸ و ۹ که تراوایی واقعی با تخمین شبکه عصبی را نمایش می‌دهد برای چاه تست تا ۹۸٪ دقت در تخمین را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه در مخزن شوریجه عامل اصلی کنترل کننده کیفیت مخزنی بافت رسوبی اولیه است و فرآیند های دیاژنزی توالی مورد نظر را کمتر تحت تأثیر قرار داده است بنابراین رابطی منطقی بین پارامترهای ورودی ما که شامل لاگ‌های نوترون، چگالی، صوتی، اشباع آب و تخلخل هستند با پارامتر هدف (تراوایی) وجود دارد و این ارتباط مشخص بین نمودارهای ورودی و خروجی باعث افزایش تخمین (۰/۹۸) در مخزن شوریجه شده است.

پژوهش نفت شماره ۱۲۶، آذر و دی ۱۴۰۱، صفحه ۱۸-۳

با توجه به‌دقت بالای که در تخمین تراوایی واقعی و تخمینی وجود دارد با قطعیت عملکرد صحیح شبکه مورد اثبات قرار گرفت. در نهایت به‌کمک شبکه عصبی با ساختار گفته شده برای چاه‌های دیگر که فاقد داده آنالیز مغزه بودند تراوایی تخمین‌زده شد تا در مرحله بعد به‌عنوان ورودی وارد ساخت فرآیند شبیه‌سازی گردد. در هر مطالعه برای مشخص کردن توزیع و گسترش هر پارامتر مخزنی و پیش‌بینی محل حفاری‌های بعدی که در میدان صورت می‌گیرد شبیه‌سازی امری لازم و ضروری است. بنابرین در این مطالعه هم بعد از تخمین صحیح تراوایی در کل چاه‌های در دسترس به ساخته مدل سه بعدی پرداختیم. در ابتدا بر پایه زمین آمار ساخت مدل ساختمانی و شبکه‌بندی مخزن صورت گرفت و بعد از فرآیند درشت نمایی و آنالیز داده‌ها به‌کمک الگوریتم‌های شبیه‌سازی گوسی متوالی (SGS) و کریجینگ (Kriging) نحوه توزیع و گسترش تراوایی در کل میدان مشخص شد. براساس نتایج جدول ۲، شبیه‌سازی با استفاده از الگوریتم شبیه‌سازی گوسی متوالی با توجه به تخمین بهتر تراوایی در مرحله مدل و همچنین انحراف معیار و واریانس نزدیک به لاگ ورودی و درشت نمایی شده از دقت بهتری برخوردار است. مقدار تراوایی بالا با زون‌های عمدتا ماسه سنگی B، D2 و D1 مربوط به محیط‌های پرانرژی (مانند رودخانه بریده بریده، بخش پر انرژی لاگون تا سدهای جزرومدی) در ارتباط است و تراوایی پایین در ارتباط محیط‌های کم انرژی (دشت سیلابی)، روخانه مئاندری و پری تایدال (بالای جزرومد) است. نحوی توزیع و گسترش تراوایی در شکل ۱۴ نشان دهنده این است که شمال غربی و بخش مرکزی میدان به‌دلیل تراوایی بالاتری نسبت بخش جنوبی و شمال شرقی از کیفیت مخزنی بهتری برخوردار است.

جدول ۲ مقایسه دو الگوریتم شبیه‌سازی گوسی متوالی (SGS) و کریجینگ (Kriging) برای سازند شوریجه

الگوریتم		حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار	واریانس
شبیه‌سازی گوسی متوالی (SGS)	لاگ درشت‌نمایی مدل	۰/۰۱۰۰ ۰/۰۱۰۰ ۰/۰۰۷	۴۱۷۸۶ ۲۹۷/۱۹ ۴۱۷/۷۰	۳/۴۷ ۴/۸۴ ۴/۷۳	۲۴/۶۵ ۲۴/۹۶ ۲۵/۴۵	۶۰۷/۸۱ ۶۲۳/۸۱ ۶۴۷/۸۵
شبیه‌سازی کریجینگ (Kriging)	لاگ درشت‌نمایی مدل	۰/۰۱۰۰ ۰/۰۱۰۰ ۰/۰۱۰۰	۴۱۷/۸۶ ۲۹۷/۱۹ ۲۹۷/۱۹	۳/۴۷ ۴/۸۴ ۰/۳۸	۲۴/۶۵ ۲۴/۹۶ ۲/۹۰	۶۰۷/۸۱ ۶۲۳/۱۲ ۸/۴۳۰



شکل ۱۴ نتایج مدل‌سازی تراوایی: الف) مدل‌سازی گوسی متوالی (SGS)، ب) فیلتر مدل‌سازی گوسی متوالی (SGS)، ج) نقشه میانگین تراوایی در کل توالی سازند شوریجه.

نتیجه‌گیری

هدف اصلی از این پژوهش تخمین صحیح تراوایی به‌کمک شبکه عصبی مصنوعی در سازند شوریجه و شبیه‌سازی این پارامتر در یکی از میادین گازی حوضه رسوبی کپه داغ است. در این مطالعه برای یافتن ارتباط بین پارامترهای ورودی شبکه با پارامتر هدف، با توجه به کراس پلات‌های مختلف لاگ‌ها و نتایج حاصل از ارزیابی پتروفیزیکی با تراوایی نمودارهای چاه‌پیمایی صوتی (DT)، نوترون (NPHI) و چگالی (RHOB) و نتایج حاصل از ارزیابی سازند شامل تخلخل مفید (PHIE) و اشباع آب موثر (SWE) به‌عنوان ورودی شبکه و پارامتر تراوایی هم به‌عنوان خروجی شبکه نتایج مطلوبی به‌دست می‌دهد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از شبکه عصبی پرسپترون چند لایه (شبکه پس انتشار خطا) در مرحله آزمایش شبکه می‌تواند تراوایی را در چاه‌هایی که از داده آن در آموزش شبکه استفاده نشده است را با دقت بسیار بالا (۹۸٪) تخمین بزند. این مقدار دقت بیان کننده توان بالای شبکه برای فهم ارتباط بین داده‌های ورودی و خروجی و همچنین اثبات دقت این شبکه برای محاسبه تراوایی در چاه‌های فاقد داده مغزه در میدان است. پس از تخمین تراوایی در چاه‌های مد نظر با استفاده از روش معمول مدل‌سازی شامل روش گوسی متوالی (SGS) و کریجینگ (Kriging) به تخمین تراوایی و نحوی توزیع و گسترش آن پرداخته شد. با توجه با مقایسه این دو الگوریتم مدل‌سازی روش تخمینی تصادفی گوسی متوالی (SGS) به‌دلیل تخمین دقیق‌تر میانگین تراوایی در کل میدان و همچنین انحراف معیار و واریانس نزدیک به تراوایی چاه می‌تواند با دقت بسیار خوبی به شبیه‌سازی پارامترهای مخزنی (تراوایی) و همچنین فهم توزیع و گسترش سه‌بعدی این پارامتر در فواصل بین چاه‌ها سازند شوریجه بپردازد. تراوایی‌های بالا بیشتر با نواحی ماسه‌سنگی سازند شوریجه که اغلب در زون‌های مخزنی B ، D2 و D1 تمرکز دارد در ارتباط هستند. زون‌هایی که شیل غلبه پیدا می‌کند یا مخلوطی از شیل، ماسه و کربناته هستند با تراوایی پایین مشخص می‌شود. همچنین نحوی توزیع و پراکندگی تراوایی در میدان حاکی از آن است که نواحی شمال غربی و مرکزی میدان نواحی مستعد برای حفاری‌های بعدی در میدان می‌باشند و نواحی جنوبی و شرقی به‌دلیل میانگین تراوایی کمتر نسبت به نواحی شمالی و غربی از پتانسیل تولیدی کمتری برخوردار هستند.

مراجع

[1]. Aminian K, Ameri S (2005) Application of artificial neural networks for reservoir characterization with limited data, Journal of Petroleum Science and Engineering, 49, 3-4: 212-222.

[2]. No H A (2011) Estimation of spatial distribution of porosity by using neural networks method in one of oil fields in South of Iran, Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 5, 8: 182-189.

[3]. Luthi S (2001) Geological well logs: Their use in reservoir modeling, Springer Science and Business Media.

[4]. Helle H B, Bhatt A, Ursin B (2001) Porosity and permeability prediction from wireline logs using artificial neural networks: a North Sea case study, Geophysical Prospecting, 49, 4: 431-444.

[5]. Lim J S (2005): Reservoir properties determination using fuzzy logic and neural networks from well data in offshore Korea, Journal of Petroleum Science and Engineering, 49, 3-4: 182-192.

[6]. Kadkhodaie-Ilkhchi A, Rezaee M R, Rahimpour-Bonab H, Chehrazi A (2009) Petrophysical data prediction from seismic attributes using committee fuzzy inference system, Computers and Geosciences, 35, 12: 2314-2330.

[7]. Kadkhodaie-Ilkhchi A, Amini A ((2009)) A fuzzy logic approach to estimating hydraulic flow units from well log data: A case study from the Ahwaz oilfield, South Iran, Journal of Petroleum Geology, 32, 1: 67-78.

[8]. Kadkhodaie Ilkhchi A, Rezaee M, Moallemi S A (2006) A fuzzy logic approach for estimation of permeability and rock type from conventional well log data: an example from the Kangan reservoir in the Iran Offshore Gas Field, Journal of Geophysics and Engineering, 3, 4: 356-369.

[9]. Mehraki M, Ashuri H, Shekiba sefat N, Ahremi Y (2010) Use of artificial neural network technique to estimate porosity and permeability in Asmari Formation The first national meeting and conference to review the

achievements of earth scientists, Azad University, North Tehran Branch, Iran.
[10]. Del Frate F, Salvatori L (2004) Oil spill detection by means of neural networks algorithms: a sensitivity analysis, In IGARSS IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2, 1370-1373.
[11]. Afshar Harb A (1979) The stratigraphy, tectonics and petroleum geology of the Kopet Dagh region, Northern Iran.
[12]. Moussavi-Harami R (1990) Lithostratigraphy and depositional history of the Upper Jurassic (Oxfordian-Kimmeridgian) rocks in Col-e-Malkabad area in southwest of Ag-Darband (abs.)(in Persian): Geological Survey of Iran, In Eighth Geological Symposium of Iran, 6-8.
[13]. Thomas J C, Cobbold P R, Shein V S, Le Douaran S (1999) Sedimentary record of late paleozoic to recent tectonism in central Asia—analysis of subsurface data from the Turan and south Kazak domains, Tectonophysics, 313, 3: 243-263.
[14].Golonka J (2004) Plate tectonic evolution of the southern margin of Eurasia in the Mesozoic and Cenozoic, Tectonophysics, 381, 1-4: 235-273.
[15]. Golonka J (2004) Plate tectonic evolution of the southern margin of Eurasia in the Mesozoic and Cenozoic, Tectonophysics, 381, 1-4: 235-273.
[16]. Moussavi Harami R, Brenner R L (1992) Geohistory analysis and petroleum reservoir characteristics of Lower Cretaceous (Neocomian) sandstones, eastern Kopet-Dagh Basin, northeastern Iran, AAPG Bulletin, 76, 8: 1200-1208.
[17]. Moussavi Harami R, Brenner R L (1993) Diagenesis of non-marine petroleum reservoirs: The Neocomian (Lower Cretaceous) Shurijeh Formation, Kopet-Dagh Basin, NE Iran, Journal of Petroleum Geology, 16, 1: 55-72.
[18]. Moussavi Harami R, Mahboubi A, Nadjafi M, Brenner R L, Mortazavi M (2009) Mechanism of calcrete formation in the Lower Cretaceous (Neocomian) fluvial deposits, northeastern Iran based on petrographic, geochemical data, Cretaceous Research, 30, 5: 1146-1156.
[19]. Moradi M, Rahimpour Bonab H, Kadkhodaie A, Chehrazi A (2022) Analysis and distribution of Hydraulic flow unit and Electrofacies in the framework of sedimentary sequences in one of the gas fields in northeastern Iran, Journal of Petroleum Research, 32, 123: 3-18.
[20]. Robert A M, Letouzey J, Kavoosi M A, Sherkati S, Müller C, Vergés J (2014) Structural evolution of the Kopet Dagh fold-and-thrust belt (North-East Iran) and interactions with the South Caspian Sea Basin and Amu Darya Basin, In EGU General Assembly Conference Abstracts 6699.
[21]. Afshar Harb A (1979) The stratigraphy, tectonicsand petroleum geology of Kopet-Dagh region, Northern Iran. Unpublished PhD Thesis, Petroleum Geology Section, Imperial College, London, 316.
[22]. Caers J (2000) Adding local accuracy to direct sequential simulation, Mathematical Geology, 32, 7: 815-850.
[23]. Kiaei H, Sharghi Y, Ilkhchi A K, Naderi M (2015) 3D modeling of reservoir electrofacies using integration clustering and geostatistic method in central field of Persian Gulf, Journal of Petroleum Science and Engineering, 135: 152-160.
[24]. Meulenkamp F, Alvarez Grima M (1999) Application of neural networks for the prediction of the unconfined compressive strength (UCS) from Equotip hardness, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 36, 1: 29-39.
[25]. Nikravesh M, Aminzadeh F (2001) Mining and fusion of petroleum data with fuzzy logic and neural network agents, Journal of Petroleum Science and Engineering, 29, 3-4: 221-238.
[26]. Deutsch C V, Srinivasan S, Mo Y (1996) Geostatistical reservoir modeling accounting for precision and scale of seismic data, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, OnePetro.
[27]. Carr L A, Benteau R I, Corrigan M P, Van Doorne G G (1989) A complex reservoir characterized by three-dimensional seismic, geostatistical reservoir description, and sponge-core analysis, SPE Formation Evaluation, 4, 03: 335-342.
[28]. Doyen P M (1988) Porosity from seismic data: A geostatistical approach, Geophysics, 53, 10: 1263-1275.
[29]. Kelkar M, Perez G (2002) Applied geostatistics for reservoir characterization, Society of Petroleum Engineers.
[30]. Diggle P J, Tawn J A, Moyeed R A (1998) Model-based geostatistics, Journal of the Royal Statistical Society: Series C, (Applied Statistics), 47, 3: 299-350.
[31]. Bahar A, Kelkar M (2000) Journey from well logs/cores to integrated geological and petrophysical properties simulation: a methodology and application, SPE Reservoir Evaluation and Engineering, 3, 05: 444-456.
[32]. Ortiz J, Deutsch C V (2002) Calculation of uncertainty in the variogram, Mathematical Geology, 34, 2: 169-183.
[33]. Tammadge A (1972) Mathematics, A Human Endeavor, By Harold R. Jacobs. Pp. xvii, 529.£ 3· 50. 1970. (WH Freeman.), The Mathematical Gazette, 56, 396: 156-156.

مطالعه آزمایشگاهی تأثیر شکاف از پیش موجود بر شکافت هیدرولیکی با استفاده از انتشار آوایی

علی اسماعیل‌زاده[1]، مجید نیکخواه*[1] و حامد شیرازی[2]

۱- دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران

۲- دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه ولایت ایرانشهر، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۷/۱۶

چکیده

عملیات شکافت هیدرولیکی به‌عنوان یکی از متداول‌ترین روش‌های ازدیاد برداشت چاه‌های نفت و گاز برای تولید مخازن نامتعارف و همچنین تولید بیشتر در مخازن، به‌کار برده می‌شود. تعیین راستای گسترش شکستگی و هندسه شبکه شکستگی ایجاد شده توسط فرآیند شکافت هیدرولیکی در افزایش نفوذپذیری مخزن نقش مهمی دارد. در این تحقیق به‌منظور درک بهتر مکانیزم ایجاد و گسترش ترک‌ها در فرآیند شکافت هیدرولیکی از انتشار آوایی (اکوستیک) استفاده شده است. آزمایش‌ها برروی نمونه‌های بلوکی بتنی تحت شرایط تنش سه محوره واقعی انجام شده و رفتارنگاری انتشار آوایی هم‌زمان با تزریق سیال به درون نمونه صورت گرفته است. به‌منظور بررسی رفتارهای انحراف ترک در فرآیند شکافت هیدرولیکی و تأثیر شکستگی‌های طبیعی سازند بر آن، از نمونه‌های شکاف‌دار استفاده شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهند که شکاف از پیش موجود، فشار شکست نمونه‌ها را کاهش داده و مقدار اختلاف تنش افقی، مسیر انتشار ترک را در طول آزمایش شکافت هیدرولیکی تحت تأثیر قرار می‌دهد. از رفتارنگاری انتشار آوایی در حین آزمایش‌های شکافت هیدرولیکی نتیجه و پاسخ مفیدی در تحلیل فرآیند شکافت هیدرولیکی به‌دست آمده و تحلیل داده‌های انتشار آوایی نشان می‌دهند که نوع ترک‌های ایجاد شده، اغلب ترک‌های کششی هستند.

کلمات کلیدی: شکافت هیدرولیکی، انتشار آوایی، تنش سه محوره واقعی، شکاف از پیش موجود، ازدیادبرداشت

مقدمه

امروزه شکافت هیدرولیکی[1] برای تولید هیدروکربن از ذخایر نفت و گاز غیرمتعارف (نفوذپذیری بسیار کم) برای ایجاد افزایش تراوایی با ایجاد شکستگی در ذخایر بسیار کاربردی است. در این روش، فرآیندهای شکستگی که هنگام شکافت هیدرولیکی سنگ‌ها اتفاق می‌افتد، اغلب به‌طور کامل شناخته نشده‌اند و نیاز به بررسی بیشتر دارند.

*مسؤول مکاتبات
آدرس الکترونیکی m.nikkhah@shahroodut.ac.ir
شناسه دیجیتال: (DOI:10.22078/PR.2022.4800.3151)

1. Hydraulic Fracturing

هدف اصلی از انجام شکافت هیدرولیکی در پروژه‌های نفت و گاز، افزایش نرخ جریان نفت یا گاز خروجی از مخازن دارای نفوذپذیری کم، افزایش نرخ جریان نفت یا گاز چاه‌های آسیب دیده، ارتباط دادن شکستگی‌های طبیعی موجود در سازند با چاه، کاهش افت فشار در اطراف چاه، افزایش ناحیه زهکشی شده یا مقدار تحت تأثیر سازند مرتبط با چاه و همچنین، مرتبط ساختن بخش قائم مخزن به چاه مایل یا افقی است [۱-۳]. تعیین راستای گسترش شکستگی و هندسه شبکه شکستگی‌های ایجاد شده توسط فرآیند شکافت هیدرولیکی در افزایش نفوذپذیری مخزن نقش مهمی دارد. محیط مخزن حاوی شکستگی‌های طبیعی است و اندرکنش شکافت هیدرولیکی با این شکستگی‌ها در تعیین هندسه شبکه شکستگی‌های ایجاد شده اهمیت زیادی دارد. ناپیوستگی‌های قرار گرفته در مسیر ترک و ویژگی‌های مکانیکی آن‌ها از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر روند پیشروی شکافت هیدرولیکی و هندسه آن شناخته می‌شوند. انتشار آکوستیک (AE)[1] سیگنال‌های ناگهانی میکرو لرزه‌ای الاستیک با فرکانس بالا است که در اثر بارگذاری جسم ایجاد و از آن ساطع می‌شود. انتشار آکوستیک پدیده‌ای است که در آن امواج الاستیک زودگذر از طریق رهاسازی سریع انرژی در منابع محلی موجود در ماده ایجاد می‌شوند. آزمون انتشار امواج آوایی یکی از روش‌های آزمون‌های غیر مخرب[2] است. وقتی که ماده‌ای جامد تحت تنش است، عیوب موجود در آن باعث ایجاد امواج آوایی(اکوستیک) با فرکانس بالا می‌گردند. این امواج در ماده منتشر شده و می‌توان توسط سنسورهای خاصی آن‌ها را دریافت کرد و با تجزیه و تحلیل این امواج می‌توان نوع عیب، مکان و شدت آن را تعیین نمود [۴-۶]. رفتارنگاری انتشار آوایی در مقیاس آزمایشگاهی قادر به بررسی شکستگی با دامنه کم است و به بررسی مناسب‌تر روند شکافت هیدرولیکی در مقیاس میدانی کمک می‌کند. ترکیبی از فشار شکست و هندسه شکستگی در آزمایش‌های شکافت هیدرولیکی و روش‌های رفتارنگاری AE می‌تواند شروع، گسترش و اتصال شکستگی‌های هیدرولیکی را تحت فشار هیدرولیکی تجزیه و تحلیل کند. رفتارنگاری AE یک گزینه موثر برای بررسی شکست و ساز و کار ناپایداری در نزدیکی چاه و نمونه آزمایشگاهی در معرض شکافت هیدرولیکی است [۷]. اولین رفتار شکافت هیدرولیکی غیراسیدی برای تحریک چاه در شهر کانزاس آمریکا در یک چاه گاز در میدان هوگوتون[3] انجام شد [۸]. از چاه‌های تولیدی حفر شده در شمال آمریکا از سال ۱۹۵۰ تاکنون، حدود ۷۰٪ چاه‌های گاز و ۵۰٪ چاه‌های نفت به روش شکافت هیدرولیکی افزایش ظرفیت یافته‌اند [۷]. در چند دهه‌ای که از عمر این روش می‌گذرد، مطالعات گسترده‌ای برروی نحوه اجرای روش و مؤلفه های تأثیرگذار برروی نتایج آن به‌همراه رفتارنگاری انتشار آوایی، توسط محققین و دانشمندان مختلف انجام شده است، که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد. استانچیتس و همکاران انتشار آوایی از آغاز شکافت هیدرولیکی و رشد در نمونه‌های سنگی را مورد بررسی قرار داده‌اند. تجزیه و تحلیل نتایج AE، افزایش فعالیت AE و ضریب همبستگی مکانی را نشان می‌دهد، که به‌طور قابل توجهی نشانگر روند ادغام ریزترک‌ها در هنگام شکافت هیدرولیکی است [۱۰]. همپتون به خصوصیات شکافت هیدرولیکی آزمایشگاهی با استفاده از انتشار آوایی پرداخت. رفتارنگاری AE در آزمایش‌های شکافت هیدرولیکی، پدیده‌های متعددی از جمله رشد شکستگی از یک گمانه، ارتباط چاه‌های میانی، تغییر مجدد جهت شکستگی، شکست پوشش گمانه و بسیاری موارد دیگر را نشان داده است [۶].علاباد به بررسی تجربی جنبه‌های ژئومکانیکی سازندهای غیرمتعارف شکافت هیدرولیکی پرداخته است.

1. Acoustic Emission
2. NonDestructive Testing – NDT
3. Hugoton

تعـدادی آزمایـش شـکافت هیدرولیکـی بـرروی نمونه‌هـای مصنوعـی گـچ انجـام شـده اسـت. هـدف از آزمایش‌هـا بررسـی دقیـق تقاطـع شـکافت هیدرولیکـی بـا شکسـتگی‌های قبلـی بـا ارزیابـی برخـی از عوامـل حاکـم بـر نتایـج آن اسـت [۱۱]. اسـتوکرت و همـکاران بـه انتشـار شکسـتگی در ماسه‌سـنگ، انتشـار آوایـی و مکانیـک شکسـت پرداخته‌انـد. آن‌هـا یـک سـری آزمایش‌هـای شکسـتگی کششـی تحـت بارگـذاری تـک محـوره و سـه محـوره انجـام داده‌انـد [۱۲]. اسـتانچیتس و همـکاران بـه آزمایـش شـکافت هیدرولیکـی که توسط انتشـار آوایـی بررسـی می‌شـود، پرداخته‌انـد. نظـارت بـر مکان‌یابی‌هـای انتشـار آوایـی، نشان‌دهنده منطقـه شکسـتگی ایجـاد شـده از جملـه تقاطـع بـا شـکاف‌های از پیـش موجـود، انتشـار سـیال در طـول شـکاف‌ها، عبـور از شـکاف‌ها و نزدیـک شـدن بـه مرزهـای بلـوک اسـت [۱۳]. ژائـو و همـکاران مطالعـه آزمایشـگاهی اثـرات بیـن لایه‌هـا در انتشـار شـکافت هیدرولیکـی در سـازند شـیل را مـورد بررسـی قـرار دادنـد. نتایـج آن‌هـا نشـان می‌دهـد کـه فشـار شکسـت بـا افزایـش ضخامـت و مقاومـت بیـن لایـه‌ای تحـت میـدان تنـش و نـرخ تزریـق افزایـش می‌یابـد [۱۴]. شـیرازی و همـکاران بـرروی تأثیـر ویسـکوزیته سـیال و قطـر چـال بـر شـکافت هیدرولیکـی مطالعـه کردنـد. نتایـج حاصـل از ایـن آزمایش‌هـا نشـان داد کـه بـا افزایـش قطـر گمانـه، فشـار شکسـت سـنگ کاهـش می‌یابـد. همچنیـن بـا افزایـش ویسـکوزیته سـیال، فشـار شکسـت کاهـش می‌یابـد [۱۵]. مائـو و همـکاران بـه آزمایـش شـکافت هیدرولیکـی روی نمونه‌هـای گرانیـت پیـش تـرک خـورده در مقیـاس بـزرگ پرداخته‌انـد. انتشـار آوایـی در کل فرآینـد شکسـتگی توسـط یـک سیسـتم اندازه‌گیـری انتشـار آوایـی ثبـت شـده اسـت. مقـدار اختـلاف تنـش افقـی در طـول آزمایش‌هـا بـه وضـوح مسـیر انتشـار تـرک را در طـول فرآینـد شکسـتگی تحت تأثیـر قـرار داده اسـت [۱۶]. لـی و همـکاران تحلیـل تجربـی رشـد شکسـتگی هیدرولیکـی و پاسـخ انتشـار آوایـی در یـک سـازه لایـه‌ای را مـورد بررسـی قـرار داده‌انـد. نتایـج تجربـی نشـان داد کـه اغلـب شکسـت برشـی در نمونه‌هـای شـیل وجـود دارد و شکسـت برشـی و کششـی در مناطـق شـکافت هیدرولیکـی ایجـاد شـده اسـت [۱۷]. فانـگ و همـکاران یـک تفسیر هندسـی گسـترش شکسـتگی هیدرولیکـی و انتشـار آوایـی را مـورد بررسـی قـرار داده‌انـد. نتایـج تجربـی نشـان می‌دهـد کـه AE در مکانـی کـه هندسـه شـکافت هیدرولیکـی پیچیده‌تـر و متراکم‌تـر اسـت وجـود دارد [۱۸]. لیانـگ و همـکاران ویژگی‌هـای پاسـخ زغال‌سـنگ در معـرض شـکافت هیدرولیکـی بـا رفتارنـگاری انتشـار آوایـی را مـورد مطالعـه قـرار داده‌انـد. نتایـج آن‌هـا نشـان می‌دهـد می‌تـوان از پاسـخ انتشـار آوایـی بـرای شناسـایی جهـت شکسـتگی در حیـن شـکافت هیدرولیکـی اسـتفاده کـرد [۱۹]. لـی و همـکاران پاسخ انتشـار آوایـی آزمایـش شـکافت هیدرولیکـی در شـیل لایـه‌ای را بررسـی کرده‌انـد [۲۰]. نـاوی و همـکاران رابطـه بیـن وقایـع لرزه‌ای و شکسـتگی ناشـی از شـکافت هیدرولیکـی را در آزمایش‌هـای آزمایشـگاهی تحـت شـرایط بارگـذاری تـک محـوره بـا رفتارنـگاری انتشار آوایـی را بررسـی کرده‌انـد [۲۱]. جیوانـگ و همـکاران بـه شـکافت هیدرولیکـی چرخشـی مغزه‌هـای گرانیـت و تأثیـر آن بـر فشـار شکسـت، دامنه‌های انتشـار آوایـی و نـرخ تزریـق پرداخته‌انـد. نتایـج تحقیـق آنهـا نشـان می‌دهـد تزریـق چرخشـی آب، فشـار شکسـت را تقریباً تـا ۲۰٪ کاهـش می‌دهـد و حداکثـر دامنـه انتشـار آوایـی به‌طـور متوسـط 14 dB کاهـش می‌یابـد [۲۲]. وانـگ و همـکاران بررسـی تجربـی شـکافت هیدرولیکـی در سـازند شـیل لایـه‌ای را انجـام داده‌انـد. آنها نشـان دادنـد کـه شـکافت هیدرولیکـی از لایه‌هـای تحـت اختـلاف تنـش بـالا عبـور می‌کنـد، درحالی‌کـه همـراه بـا لایه‌هـای تحـت اختـلاف تنـش کـم گسـترش می‌یابـد [۲۳]. جیانـگ و همـکاران بـه ویژگی‌هـای انتشـار آوایـی در شـکافت هیدرولیکـی براسـاس یـک مطالعـه آزمایشـگاهی پرداخته‌انـد. نتایـج آن‌هـا نشـان می‌دهـد تـرک کششـی در تمـام آزمایش‌هـای شـکافت هیدرولیکـی بیشـتر اسـت [۲۴].

در پژوهش حاضر مطالعه آزمایشگاهی برروی نمونه‌های بلوکی بتنی تحت شرایط تنش سه محوره واقعی انجام شده و رفتارنگاری انتشار آوایی همزمان با تزریق سیال به درون نمونه برای شبیه‌سازی آزمایش شکافت هیدرولیکی صورت گرفته است. به‌منظور بررسی توسعه ترک خوردگی در فرآیند شکافت هیدرولیکی تحت تأثیر شکستگی‌های طبیعی سازند بر آن، از نمونه‌های شکاف‌دار استفاده شده است. در راستای نیل به اهداف تحقیق، تأثیر شکاف موجود در نمونه بر میزان فشار شکافت هیدرولیکی همراه با تحلیل داده‌های رفتارنگاری انتشار آوایی همزمان با انجام آزمایش‌های شکافت هیدرولیکی صورت پذیرفته است.

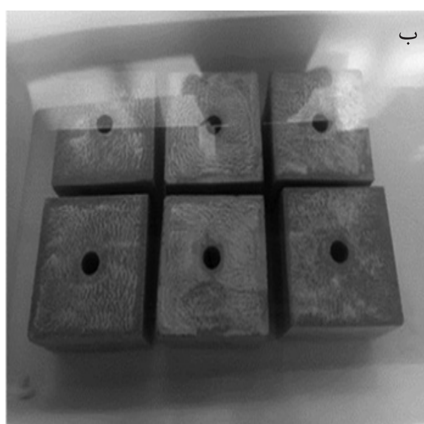
آماده‌سازی و روش کار

تهیه نمونه

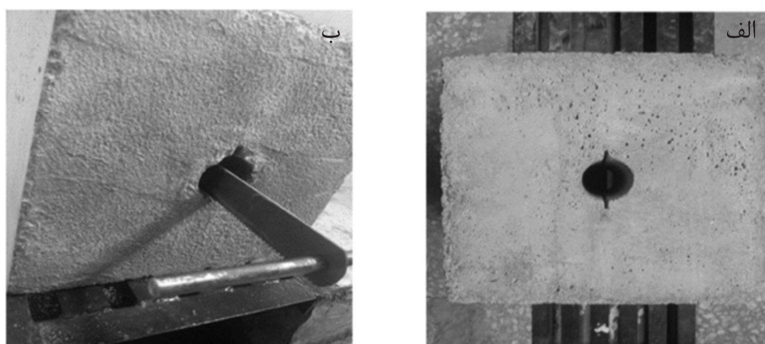
طرح اختلاط برای تهیه نمونه مصنوعی پایه بتنی شامل، ترکیب ماسه، سیمان، آهک و آب بوده است. نسبت اختلاط مواد به‌صورت وزنی بوده است که نسبت ماسه به سیمان ۳ به ۱ و نسبت ماسه به آهک ۳ به ۰/۲۵ در نظر گرفته شده است. همچنین مقدار آب اضافه شده به این ترکیب نیز ۰/۲۵ واحد نسبت به ماسه و ۰/۷۵ واحد نسبت به سیمان است. برای خروج حباب و ایجاد ارتعاش در حین بتن‌ریزی براساس استانداردهای ASTM عمل شده است، به‌طوری که پس از هم‌زدن مصالح ریخته شده در قالب و گذشت h ۲۴ از بتن‌ریزی، میله فولادی را از مرکز نمونه‌ها خارج کرده و نمونه‌ها را نیز از قالب‌ها خارج کرده و در حوضچه آب قرار داده شدند. سپس بعد از گذشت ۷ روز از بتن‌ریزی، نمونه‌ها در محیط آزاد قرار گرفته تا برای انجام آزمایش آماده شوند. بتن‌ریزی نمونه‌های مکعبی و قرار دادن آن‌ها در حوضچه آب در شکل ۱ آورده شده است. مراحل بتن‌ریزی و طرح اختلاط برای همه نمونه‌ها یکسان در نظر گرفته شده است. متوسط مقاومت فشاری نمونه‌ها MPa ۲۴/۹۴ و متوسط مقاومت کششی نمونه‌ها MPa ۳/۲۰ بوده است.

برای بررسی درخصوص روند گسترش ترک در فرآیند شکافت هیدرولیکی، به‌وسیله اره لنگ برروی ۳ نمونه بتنی، ۲ شکاف برروی دیواره حفره و به‌صورت موازی و مقابل هم ایجاد شده‌اند که شکاف‌ها موازی با تنش افقی حداکثر قرار گرفته است. هدف بررسی تأثیر شکاف از پیش موجود و تأثیر آن در روند گسترش ترک و همچنین مقایسه‌ای بین نمونه‌های بدون شکاف و شکاف‌دار در ترکیبات تنش مشابه است. عمق این شکاف‌ها mm ۱۰ و ضخامت آن‌ها در حدود mm ۴ هستند. شکل ۲ شکاف از پیش موجود و روند ایجاد آن را نشان می‌دهد.





شکل ۱ الف) تهیه نمونه‌های مکعبی و ب) قرار دادن نمونه‌ها در حوضچه آب



شکل ۲ تهیه نمونه شکاف‌دار: الف) شکاف از پیش موجود و ب) روند ایجاد شکاف

تجهیزات

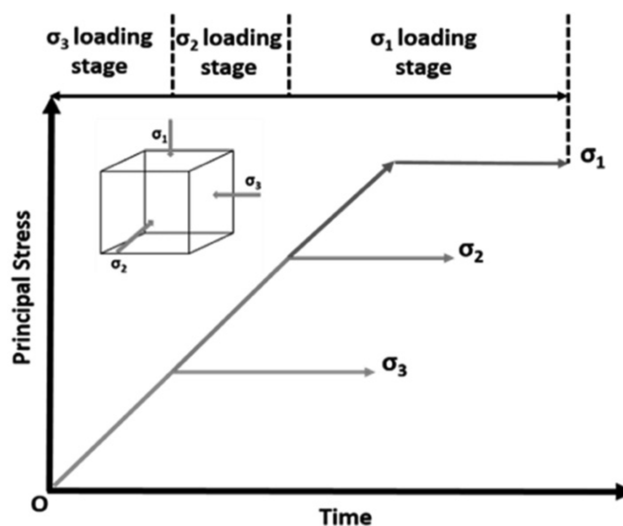
برای انجام آزمایش‌های شکافت هیدرولیکی از دستگاه سه محوره واقعی با قابلیت شبیه‌سازی ایجاد شکستگی هیدرولیکی استفاده شده است. این دستگاه شامل محفظه اعمال فشار، واحد تزریق، واحد هیدرولیک و واحد جمع‌آوری و نظارت بر داده‌ها است [۱۵]. شکل ۳ اجزای مختلف دستگاه سه محوره واقعی را نشان می‌دهد. در این تحقیق برای رفتارنگاری انتشار آوایی از دستگاه AMSY-6 مدل MB2 ساخت شرکت Vallen کشور آلمان استفاده شده است. سنسور استفاده شده به نام VS900-M یک سنسور پیزوالکتریک AE است که دارای محدوده فرکانسی ۱۰۰ تا kHz ۹۰۰ و فرکانس حداکثر آن kHz ۳۵۰ است. نرم‌افزار Vallen AE-Suite برای دستیابی به داده‌ها و پردازش داده‌های اندازه‌گیری AE ارائه شده است [۲۵]. در آزمایش‌های شکافت هیدرولیکی برای سیال تزریقی، از روغن هیدرولیک h ۶۸ در همه آزمایش‌ها استفاده شده است. برای آب‌بندی انتهای حفره موجود در نمونه‌های مکعبی، از چسب سنگ استفاده شده است. در آزمایش شکافت هیدرولیکی، از ۴ سنسور پیزوالکتریک انتشار آوایی استفاده شده است. به‌منظور نصب سنسورها، صفحه‌های فلزی طراحی شد که بین نمونه و جک‌های هیدرولیکی دستگاه قرار می‌گیرد و سنسور درون این صفحات جانمایی شده است. یک محفظه نیز برای سنسور ایجاد شده است که در آن قرار می‌گیرد و در اطراف دیواره‌های جانبی سنسور از فوم استفاده شده است.

روش کار

اعمال تنش‌های جانبی و قائم به‌صورت سه محوره واقعی بارگذاری شده است، یعنی هر سه محور تنش تا مقدار تنش افقی حداقل بارگذاری می‌شوند و سپس تنش افقی حداقل ثابت می‌شود و تنش‌های افقی حداکثر و تنش قائم تا مقدار تنش افقی حداکثر بارگذاری می‌شوند و تنش افقی حداکثر ثابت می‌شود و سپس تنش قائم به مقدار تعیین شده بارگذاری می‌شود. مسیر بارگذاری شرایط تنش سه محوره واقعی در شکل ۴ آورده شده است. پس از تثبیت تنش‌های قائم و جانبی، داخل سامانه تزریق دستگاه با سیال تزریق مورد نظر پر می‌شود و عملیات تزریق آغاز می‌شود. همزمان با شروع تزریق سیال، رفتارنگاری انتشار آوایی آغاز می‌شود و زمانی‌که شکست در نمونه اتفاق افتاد آزمایش به اتمام رسیده و افت فشار رخ می‌دهد که همزمان تزریق سیال و انتشار آوایی متوقف می‌شوند. برای بررسی تأثیر شکاف‌ها برروی فشار شکست نمونه‌ها، ترکیبات تنش مشابه که برروی نمونه‌های بدون شکاف آزمایش شده است، برروی ۳ نمونه دارای شکاف اعمال شده است. شکاف‌ها برروی دیواره حفره و به‌صورت موازی و مقابل هم ایجاد شده‌اند که در داخل دستگاه به‌صورت موازی با تنش افقی حداکثر قرار گرفته است. نتایج به‌دست آمده از آزمایش نمونه‌های شکاف‌دار و بدون شکاف در ترکیبات تنش مشابه در جدول ۱ آورده شده است.



شکل ۳ a) محفظه اعمال فشار، b) واحد تزریق، c) واحد هیدرولیک، d) واحد جمع‌آوری و نظارت بر داده‌ها



شکل ۴ مسیر بارگذاری شرایط تنش سه محوره واقعی

جدول ۱ نتایج به‌دست آمده از آزمایش نمونه‌های شکاف‌دار و بدون شکاف در ترکیبات تنش مشابه

نوع نمونه	فشار شکستگی (MPa)	تنش قائم (MPa)	تنش افقی حداکثر (MPa)	تنش افقی حداقل (MPa)	کد نمونه
بدون شکاف	۹/۱۵	۱۰	۵	۵	Cube 5
شکاف‌دار	۸/۹۶	۱۰	۵	۵	Cube 19
بدون شکاف	۶/۶۵	۷	۱۰	۷	Cube 12
شکاف‌دار	۶/۱۹	۷	۱۰	۷	Cube 20
بدون شکاف	۱۱/۶۷	۱۵	۱۰	۵	Cube 18
شکاف‌دار	۱۱/۵۳	۱۵	۱۰	۵	Cube 21

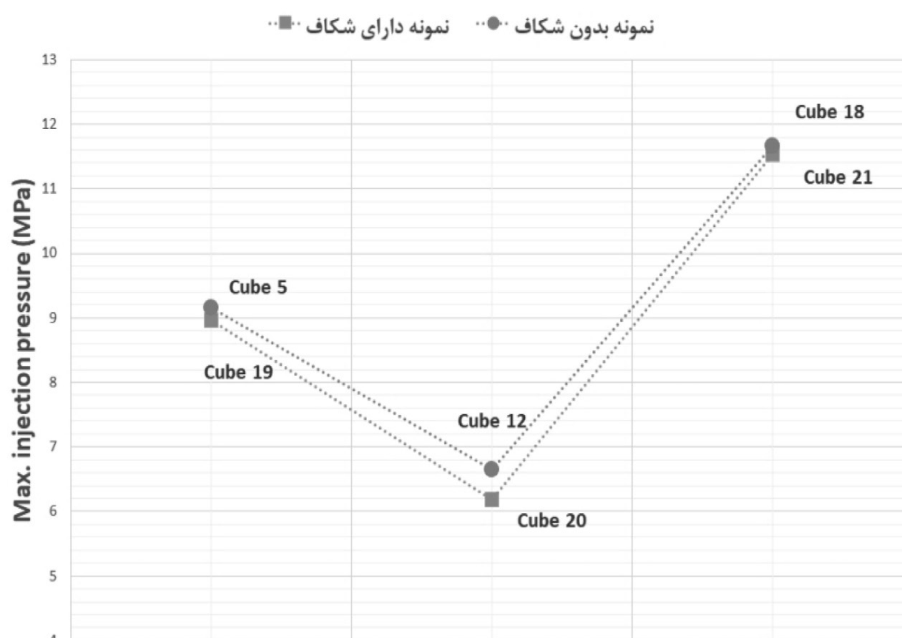
نتایج و بحث

تأثیر شکاف از پیش موجود برروی فشار شکافت هیدرولیکی

تأثیر شکاف از پیش موجود بر فشار تزریق سیال در لحظه شکست نمونه‌ها در شکل ۵ آورده شده است. آزمایش‌های شکافت هیدرولیکی برروی نمونه‌های شکاف‌دار باعث تغییر فشار شکست می‌شوند و اهمیت شکاف‌های طبیعی را در شروع و گسترش شکافت هیدرولیکی نشان می‌دهد. به‌علت وجود شکاف از پیش موجود، نمونه‌های شکاف‌دار نسبت به نمونه‌های فاقد شکاف، فشار شکست پایین‌تری دارند. فشار شکستگی در نمونه‌های شکاف‌دار به‌وضوح پایین‌تر است و می‌تواند به‌دلیل کاهش دادن و برطرف نمودن تنش‌های متمرکز اطراف چال در اثر وجود شکاف باشد که نقش مهمی در شروع شکست و کاهش اثر شرایط تنش اطراف چال دارد. شکاف از پیش موجود تمرکز تنش اطراف چال را برطرف می‌کند و باعث کاهش فشار شکستگی و شکاف از پیش موجود برروی هندسه شکست نیز تأثیر دارد و باعث پیچیده شدن هندسه شکستگی می‌شود.

تحلیل هندسه شکافت هیدرولیکی

شکستگی‌های هیدرولیکی در جهت عمود بر تنش افقی حداقل ایجاد می‌شوند. معمولاً شکستگی‌های هیدرولیکی در یک مسیر پرپیچ و خم که به‌طور قابل توجهی از یک صفحه منحرف می‌شوند، توسعه می‌یابند. در حالت شکستگی قائم، تنش قائم برابر با وزن طبقات فوقانی در نظر گرفته می‌شود و زمانی رخ می‌دهد که فشار سیال در چال به‌همراه مقاومت کششی، کمتر از تنش قائم ناشی از وزن روباره شود. این مورد مربوط به شکست دیواره گمانه است که در یک صفحه شکافت هیدرولیکی قائم، ایجاد می‌شود. در شکل ۶ هندسه شکست نمونه‌های شکاف‌دار و بدون شکاف تحت آزمایش شکافت هیدرولیکی سه محوره واقعی نشان داده شده است. هنگامی‌که تنش‌های افقی متفاوت هستند و به عبارتی دیگر، حالت ناهمسان‌گرد در تنش‌ها باشند، شکستگی‌های هیدرولیکی در راستای تنش افقی حداکثر گسترش می‌یابند و هنگامی‌که تنش‌های افقی برابر باشند و حالت همسانگرد در تنش‌ها برقرارباشد، شکستگی‌های هیدرولیکی به‌صورت تصادفی شعاعی گسترش می‌یابند.

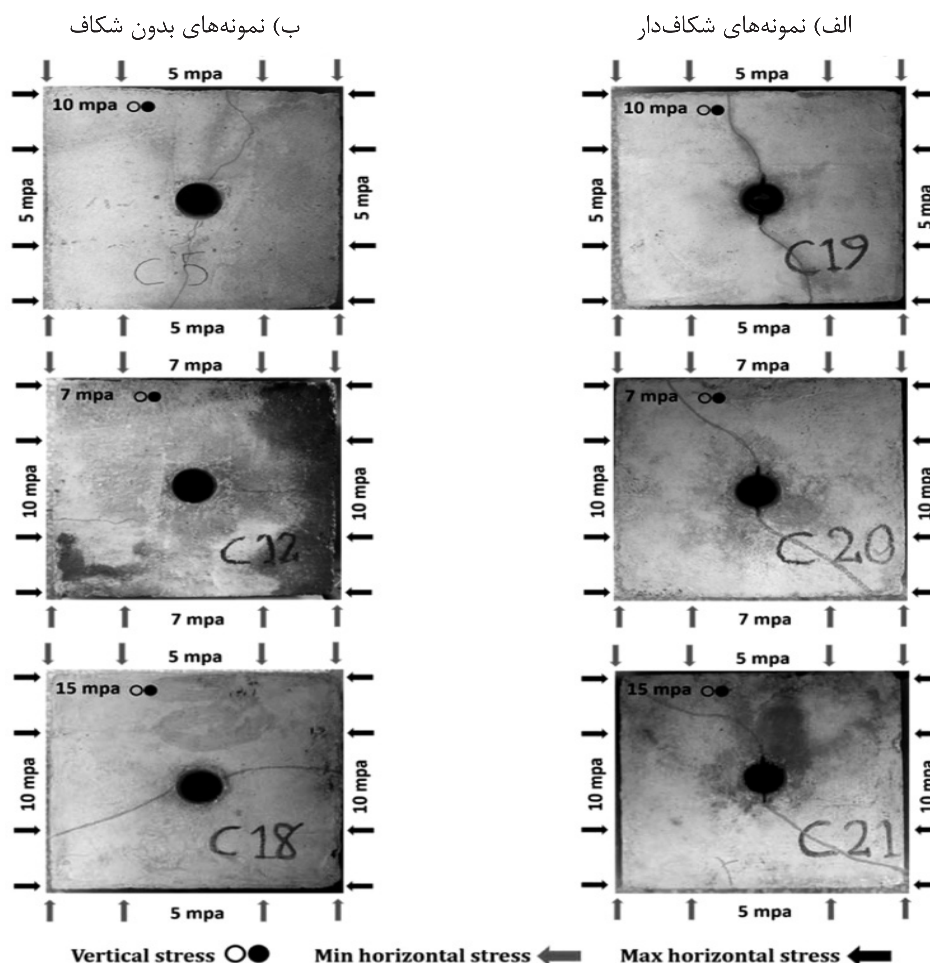


شکل ۵ تأثیر شکاف از پیش موجود بر فشار تزریق سیال در لحظه شکست نمونه‌ها

پژوهش نفت شماره ۱۲۶، آذر و دی ۱۴۰۱، صفحه ۳۷-۱۹

الف) نمونه‌های شکاف‌دار

ب) نمونه‌های بدون شکاف



شکل ۶ هندسه شکستگی هیدرولیکی: الف) نمونه‌های شکاف‌دار و ب) نمونه‌های بدون شکاف در ترکیبات تنش مشابه

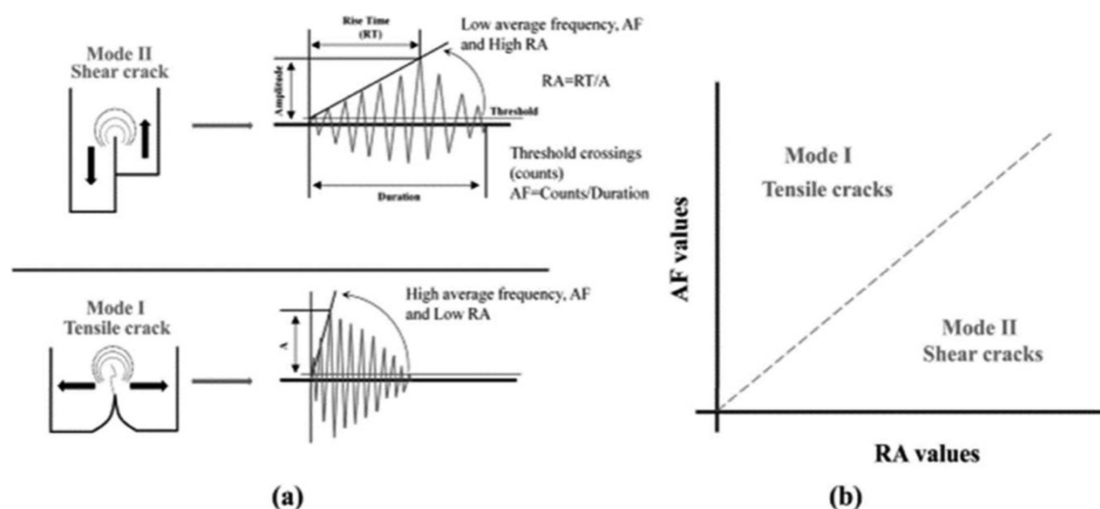
با توجه به شکل ۶، با وجود شکاف از پیش موجود هندسه شکست به کلی تغییر می‌کند به گونه‌ای که در نمونه Cube 19 که اختلاف تنش‌های جانبی صفر است، شکستگی از نوک شکاف از پیش موجود ایجاد شده و در امتداد جهت شکاف گسترش یافته است. بدیهی است که در ترکیبات تنش همسانگرد شکستگی به‌سمت تنش افقی حداکثر تغییر مسیر نمی‌دهد. این مورد نشان می‌دهد که شکاف از پیش موجود می‌تواند شکستگی را به‌طور موثر کنترل و هدایت کند و در اختلاف تنش‌های جانبی پایین، شکستگی در امتداد شکاف گسترش پیدا کرده است. در نمونه Cube 20 که اختلاف تنش‌های جانبی اعمال شده به آن ۳ MPa بوده است، مشاهده می‌شود که شکستگی‌ها در دو طرف چال از نوک شکاف از پیش موجود ایجاد شده‌اند و در همین حال یک انحراف جزئی به‌سمت تنش افقی حداکثر دارند. همچنین در نمونه Cube 21 هنگامی‌که اختلاف تنش‌های جانبی اعمال شده ۵ MPa است، شکستگی‌ها از نوک شکاف‌های از پیش موجود ایجاد شده‌اند و در ادامه به‌وضوح به‌سمت تنش افقی حداکثر تغییر مسیر داده‌اند. بنابراین، شکاف‌های از پیش موجود یک نقطه اولیه برای انتشار شکستگی را فراهم می‌کنند و با این حال، هندسه شکستگی همراه با تغییر مقدار اختلاف تنش‌های جانبی تغییر می‌کند. این تغییر هندسه شکستگی شامل اختلاف تنش‌های جانبی پایین که فقط شکست در امتداد جهت شکاف از پیش موجود گسترش می‌یابد تا اختلاف تنش‌های جانبی بالا که باعث انحراف آشکار شکستگی به‌سمت تنش افقی حداکثر شده است.

تحلیل نتایج رفتارنگاری AE آزمایش‌های شکافت هیدرولیکی

روش تحلیل پارامتری انتشار آوایی براساس پارامترهای سیگنال انتشار آوایی انجام می‌شود. روش دوم تحلیل شکل موج که براساس تجزیه و تحلیل شکل موج دامنه زمان انتشار آوایی و روش تحلیل طیف سیگنال برای به‌دست آوردن اطلاعات طیف شکل موج سیگنال آوایی است. شکل موج آوایی تمام اطلاعاتی مانند وضعیت تنش، ساختار خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه را در بر می‌گیرد [۲۶]. با استفاده از انتشار آوایی تولید شده، می‌توان نوع ترک خوردگی (کششی یا برشی) را بررسی کرد. ترک‌های کششی و برشی انواع مختلفی از شکل موج‌های AE را منتشر می‌کنند، طبقه‌بندی نوع ترک را با استفاده از پارامترهای AE می‌توان مورد مطالعه قرار داد. این روش طبقه‌بندی قادر به شناسایی سه مرحله فرآیند بارگذاری، یعنی مرحله تولید ترک کششی، مرحله تغییر نوع ترک و مرحله تولید ترک برشی است [۲۷]. ترک‌های کششی موجود در مقایسه با ترک‌های برشی امواجی با زاویه خیز پایین و فرکانس متوسط بالا تولید می‌کنند. تشخیص امواج آوایی وقتی شکست کششی و برشی رخ می‌دهد و محدوده فرکانس متوسط و زاویه خیز برای ترک‌های کششی و برشی در شکل ۷ مشاهده می‌شود [۲۸].

پارامتر شمارش (کانت) AE

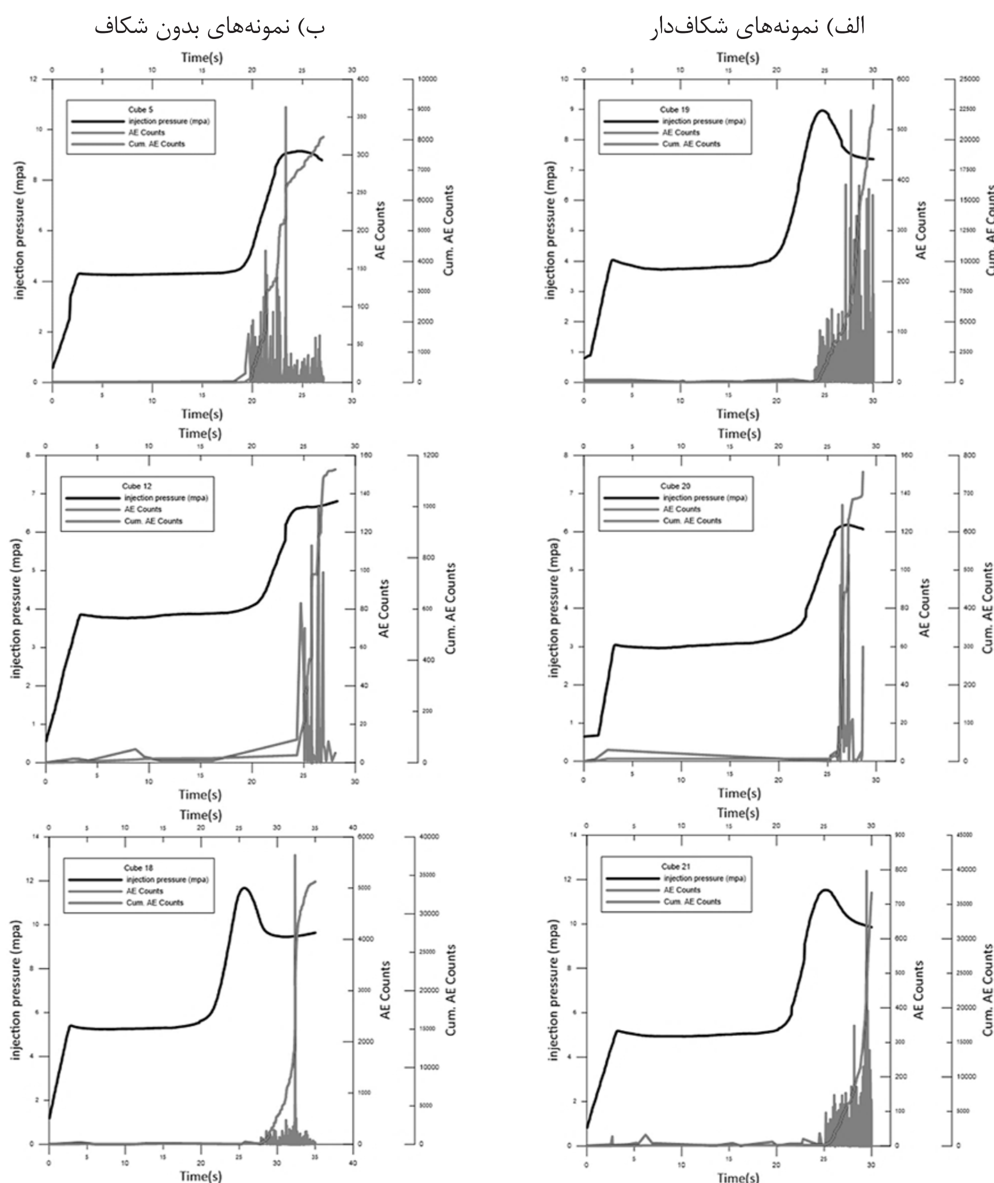
یکی از پارامترهای مهم انتشار آوایی، بررسی تغییرات تعداد شمارش[1] و مقدار تجمعی شمارش است و به تعداد پالس‌های عبوری از حد آستانه که توسط پردازشگر سیگنال AE دریافت می‌شود، گفته می‌شود. فعالیت انتشار آوایی در لحظه حداکثر فشار تزریق سیال، افزایش یافته است. به‌وسیله AE می‌توان نقطه شکست نمونه‌ها را تعیین و اندازه‌گیری کرد. نتایج آزمایش مقدار شمارش و تجمعی شمارش AE در شکل ۸، همراه با فشار تزریق سیال در طول زمان آزمایش نشان داده شده است. با توجه به شکل‌ها فعالیت انتشار آوایی در دوره اولیه تزریق سیال پایین بوده است و در ادامه پس از ایجاد ریزترک‌ها در نمونه‌ها افزایش یافته است تا لحظه‌ای که به مقدار حداکثر خود برسد و سپس کاهش بیابد. حداکثر مقدار فشار تزریق در لحظه ایجاد شکستگی از نوک شکاف از پیش موجود رخ داده است و سپس شکستگی‌ها به‌سرعت به‌سطح نمونه گسترش یافته‌اند. پس از نقطه حداکثر فشار تزریق، مقدار شمارش AE نیز کاهش می‌یابد.



شکل ۷ روش طبقه‌بندی ترک‌ها a) شکل موج b) روش طبقه‌بندی ترک [۲۶]

1. Count

پژوهش نفت شماره ۱۲۶، آذر و دی ۱۴۰۱، صفحه ۳۷-۱۹



شـــکل ۸ نمـودار تغییـرات مقـدار شـمارش، شـمارش تجمعـی و فشـار تزریـق سـیال: الـف) نمونه‌هـای شـکاف‌دار و ب) نمونه‌هـای بـدون شـکاف

همچنیـن، مقـدار تجمعـی شـمارش AE تـا زمـان ایجـاد شکسـت، متناسـب بـا مقـدار اختـلاف تنش‌هـای جانبـی اسـت. مقـدار شـمارش AE و تجمعـی شـمارش AE برای ترکیـب تنـش همسـانگرد بیشـتر اسـت. بـا مشـاهده مقـدار شـمارش AE در لحظـه شـروع شکسـت، افزایـش انـرژی تحـت اختـلاف تنـش جانبـی کمتـر در نمونـه Cube 19، بیشـترین مقـدار را داشـته اسـت و کمتریـن مقـدار نیـز مربـوط بـه نمونه‌هـای Cube 20 و Cube 21 می‌باشـد کـه اختـلاف تنش‌هـای جانبـی بالاتـر بـوده اسـت. تغییـرات مقـدار شـمارش AE در مرحلـه اول تزریـق سـیال بـه بسـته شـدن ریزترک‌هـا و تشـکیل آن‌هـا در مـرز ذرات سـاختار نمونه‌هـا اشـاره دارد کـه بـا به‌وجـود آمـدن ترک‌هـای ناپایـدار و اتصـال ترک‌هـای موجـود باعـث افزایـش شـدید شـمارش می‌شـوند. افزایـش فشـار تزریـق تـا مقـدار حداکثـر نشـان می‌دهـد. تـرک از نـوک شـکاف از پیـش موجـود شـروع شـده و باعـث می‌شـود سـنگ دانه‌هـای نمونه‌هـای بتنـی از هـم جـدا شـده و باعـث ایجـاد شکسـت در نمونـه شـود و افزایـش ناگهانـی در مقـدار سـیگنال‌های AE و شـمارش AE مشـاهده شـده اسـت.

بعد از نشت سیال و کاهش مقدار فشار تزریق، مقدار شمارش AE نیز کاهش می‌یابد. در مقایسه بین نمونه‌های شکاف‌دار و بدون شکاف مقدار تجمعی شمارش AE در نمونه‌های شکاف‌دار بیشتر است و با سرعت بیشتری در لحظه حداکثر فشار تزریق، افزایش می‌یابد. دلیل این مورد می‌تواند در اثر وجود شکاف از پیش موجود باشد که باعث انحراف ترک می‌شود و این منحرف شدن ترک باعث می‌شود کار بیشتری در نمونه‌ها انجام شود و به‌دنبال آن سیگنال‌های AE بیشتری دریافت شود. همچنین، وجود شکاف از پیش موجود که نقش یک سطح آزاد اولیه برای ایجاد شکست دارد، باعث می‌شود قبل از شکست رویدادهای کوچک AE در اثر ایجاد ریزترک‌ها بیشتر شود و باعث افزایش مقدار تجمعی شمارش AE در نمونه‌های شکاف‌دار شود. این رویدادهای کوچک با انرژی کمتری همراه هستند، ولی به‌دلیل تعداد زیاد آن‌ها باعث افزایش مقدار تجمعی انرژی AE نمونه‌های شکاف‌دار نسبت به نمونه‌های بدون شکاف شده است.

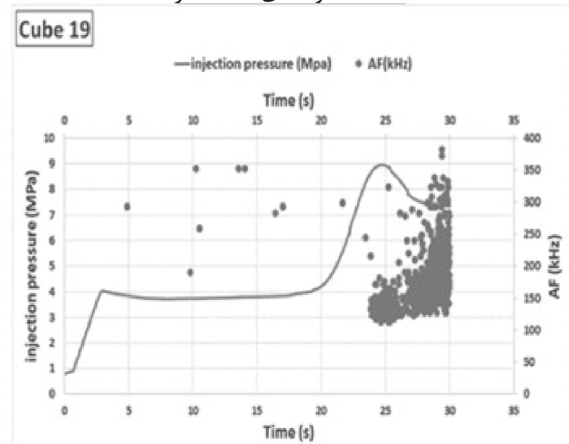
فرکانس متوسط، زاویه خیز و طبقه‌بندی نوع ترک‌ها

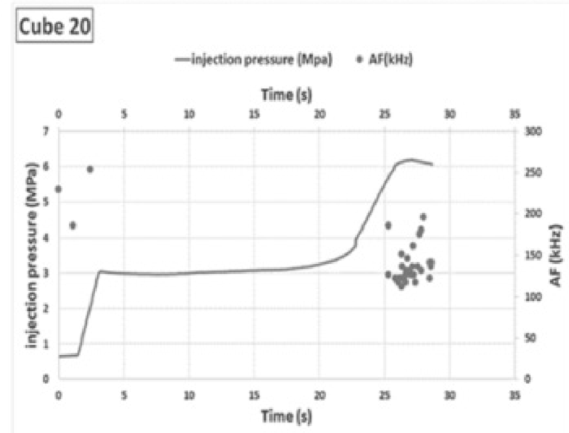
نسبت تعداد شمارش‌ها به‌مدت زمان[1] موج AE که با AF [2] نشان داده می‌شود را فرکانس (فراوانی) متوسط می‌گویند. مقدار RA [3] نشان‌دهنده نسبت زمان خیز[4] به دامنه موج[5] AE است. ترک نوع کششی به‌صورت سیگنال AE با فرکانس متوسط بالا و مقدار زاویه خیز پایین تعیین شده و ترک برشی با فرکانس متوسط پایین و مقدار زاویه خیز بالا مشخص می‌شود. فرکانس متوسط (AF) و زاویه خیز (RA) نمونه‌های شکاف‌دار در کنار نمونه‌های بدون شکاف به‌ترتیب در شکل‌های ۹ و ۱۰ به‌همراه فشار تزریق سیال در طول زمان آزمایش نشان داده شده است. به‌طور کلی، RA در مرحله اول شکستگی که در اثر تزریق سیال باعث توسعه ریزترک‌ها شده است، کاهش می‌یابد و در همین مرحله AF افزایش می‌یابد. بعد از این مرحله، RA افزایش می‌یابد و AF کاهش می‌یابد تا پایان مرحله دوم که شامل ایجاد ماکروترک‌ها در اثر تزریق سیال می‌باشد، این روند باقی می‌ماند. در مرحله آخر لحظه‌ای که فشار تزریق نقطه حداکثر خود را سپری کرده است، سیال نشت می‌کند و باعث افت فشار تزریق می‌شود، نمونه به شکست می‌رسد و ماکروترک‌ها در حال باز شدن از یکدیگر هستند. در این مرحله، RA کاهش می‌یابد ولی AF در این لحظه افزایش می‌یابد. مقدار فرکانس متوسط برای نمونه‌های شکاف‌دار و بدون شکاف تفاوت زیادی ندارد. در طول زمان تزریق سیال ترک‌های کششی و برشی در نمونه‌های شکاف‌دار بیشتر از نمونه‌های بدون شکاف است. همچنین، ترک‌های برشی بیشتری در نمونه‌های شکاف‌دار ایجاد شده است. با توجه به این دو پارامتر مختلف، می‌توان ترک‌ها را به ترک‌های کششی و برشی طبقه‌بندی کرد. شکل ۱۱ طبقه‌بندی نوع ترک‌ها براساس AF-RA را نشان می‌دهد. شکست در طی فرآیند شکافت هیدرولیکی دارای دو مدل ترک یعنی ترک کششی و ترک برشی می‌باشد که انرژی AE در ترک‌های برشی معمولاً بیشتر از ترک‌های کششی است. در نمونه‌های شکاف‌دار هنگامی‌که فشار تزریق به مقدار حداکثر خود می‌رسد، شکست از نوک شکاف از پیش موجود شروع شده و سپس در مدت زمان کوتاهی به سطح نمونه گسترش می‌یابد. پس از تجزیه و تحلیل ویژگی‌های مدل شکست و رویدادهای AE، مقدار درصد رویدادهای ترک برشی در لحظه شروع شکست برای نمونه‌های شکاف‌دار به‌ترتیب به‌صورت Cube 19> Cube 21> Cube 20 می‌باشد و مقدار انرژی تجمعی AE رویدادهای برشی نیز به‌ترتیب برای نمونه‌های شکاف‌دار Cube 19> Cube 21> Cube 20 می‌باشد.

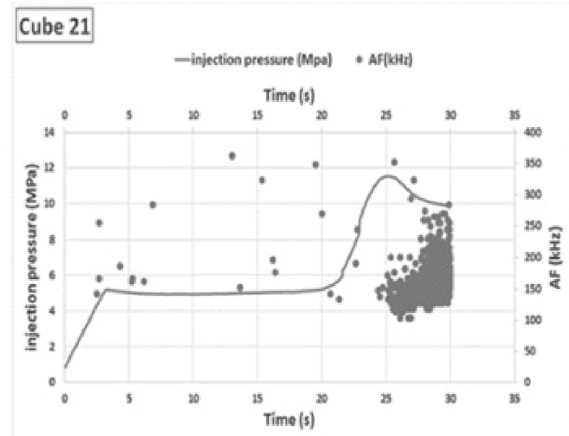
1. Duration
2. Average Frequency
3. Rise Angle
4. Rise Time
5. Amplitude

پژوهش نفت شماره ۱۲۶، آذر و دی ۱۴۰۱، صفحه ۳۷-۱۹

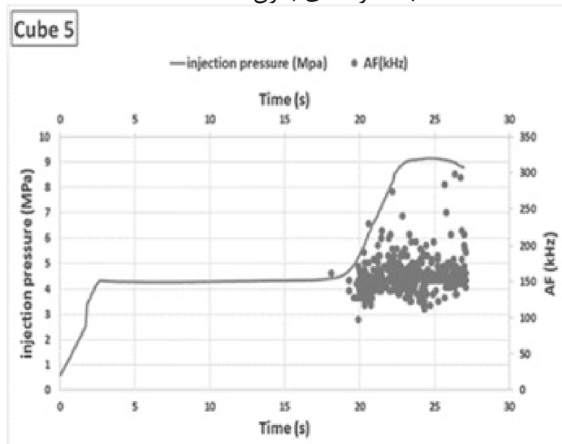
الف) نمونه‌های شکاف‌دار

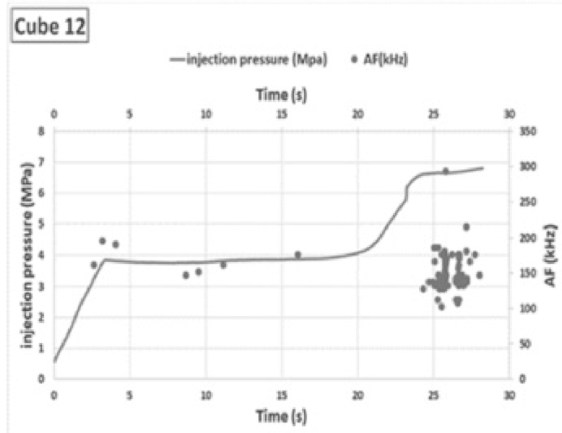


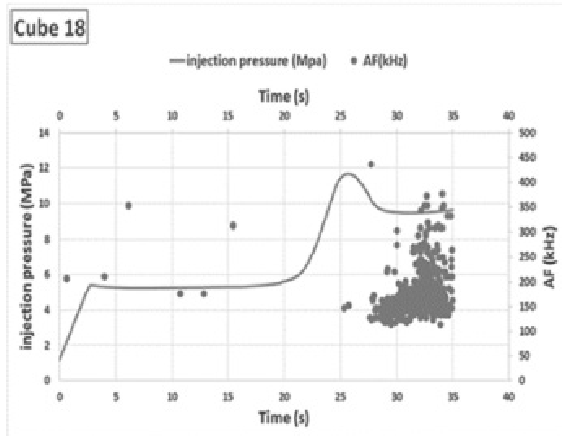




ب) نمونه‌های بدون شکاف



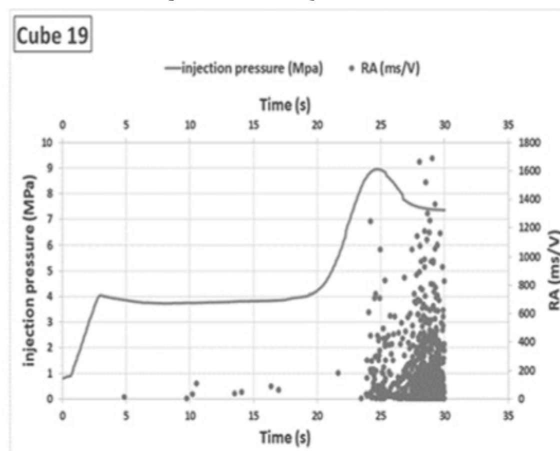


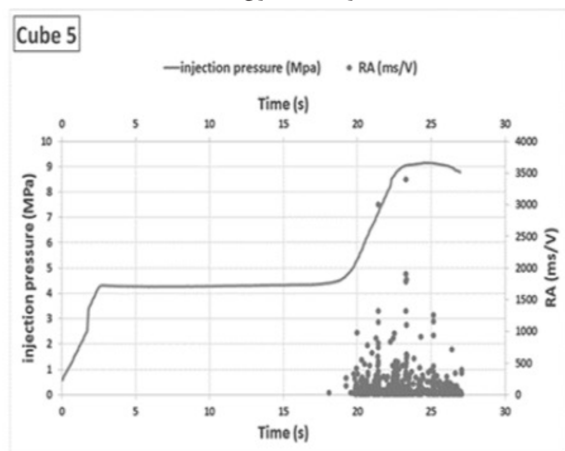


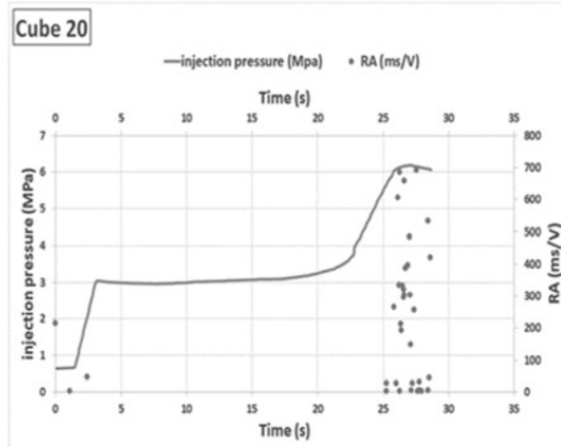
شکل ۹ نمودار تغییرات مقدار فرکانس متوسط و فشار تزریق سیال: الف) نمونه‌های شکاف‌دار و ب) نمونه‌های بدون شکاف

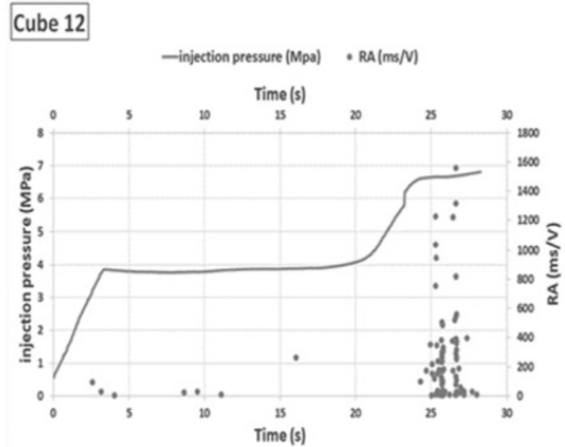
الف) نمونه‌های شکاف‌دار

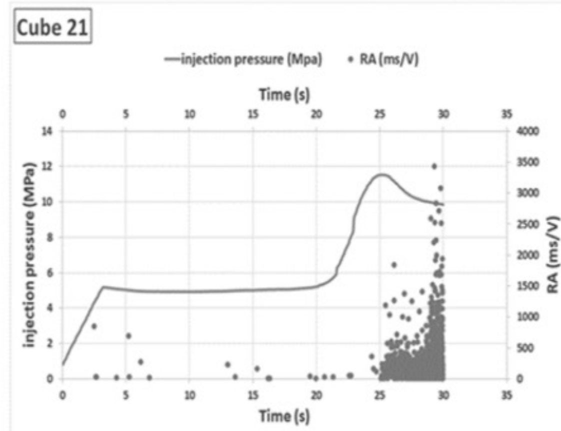
ب) نمونه‌های بدون شکاف

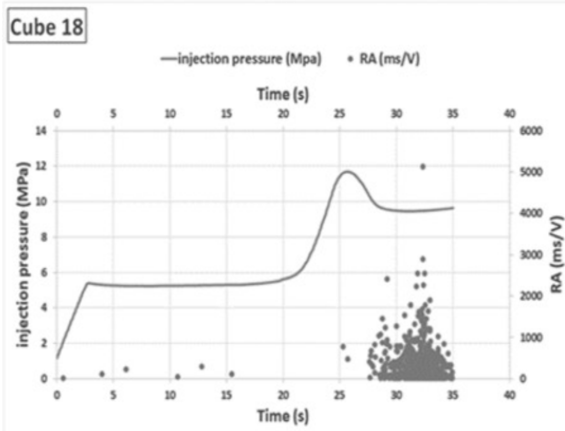








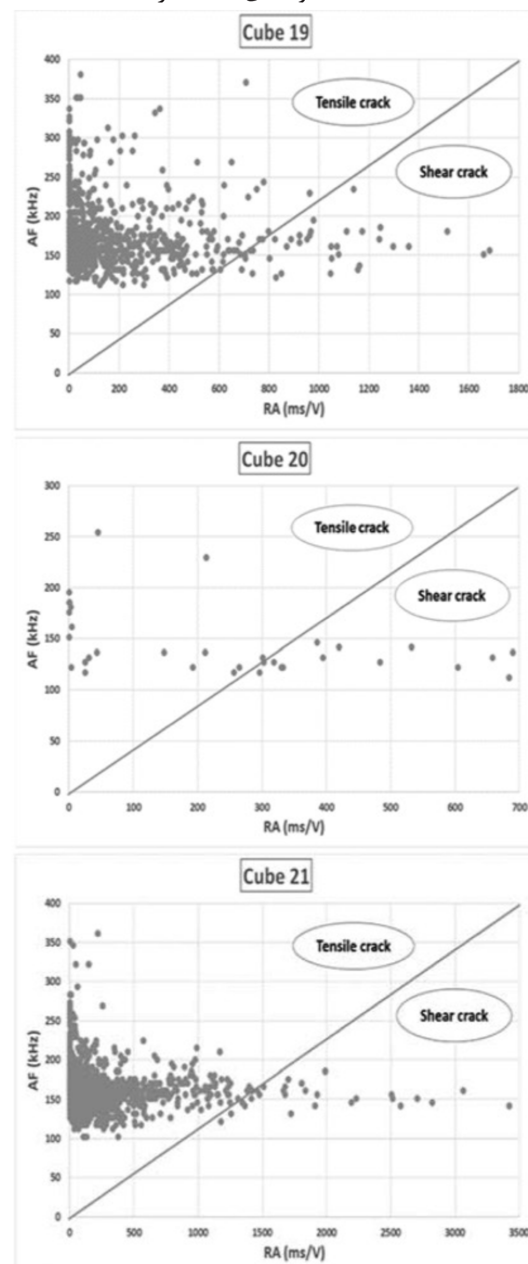




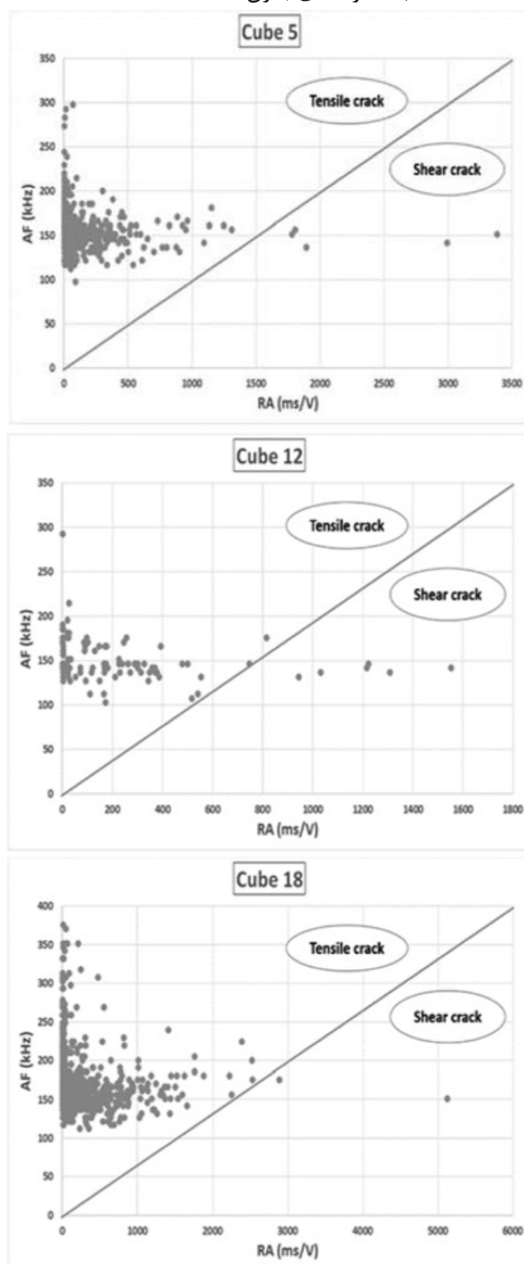
شکل ۱۰ نمودار تغییرات مقدار زاویه خیز و فشار تزریق سیال: الف) نمونه‌های شکاف‌دار و ب) نمونه‌های بدون شکاف

پژوهش نفت شماره ۱۲۶، آذر و دی ۱۴۰۱، صفحه ۳۷-۱۹

الف) نمونه‌های شکاف‌دار



ب) نمونه‌های بدون شکاف



شکل ۱۱ طبقه‌بندی نوع ترک‌ها برای آزمایش شکافت هیدرولیکی: الف) نمونه‌های شکاف‌دار و ب) نمونه‌های بدون شکاف

دلیل این که در نمونه‌های شکاف‌دار ترک برشی بیشتری ایجاد شده است و به‌دنبال آن دارای انرژی تجمعی AE بالاتری می‌باشند، می‌تواند به انحراف ترک مربوط باشد که باعث افزایش درصد رویدادهای ترک برشی می‌شود که هر چه هندسه شکست نامنظم‌تر باشد، درصد وقوع ترک‌های برشی افزایش می‌یابد. با توجه به هندسه شکستگی‌ها و طبقه‌بندی نوع ترک‌ها براساس روش RA-AF مدل اصلی شکست، ترک‌های کششی هستند که در طول فرآیند تزریق سیال ایجاد شده‌اند. ترک‌های برشی باعث انحراف شکستگی می‌شوند و معمولاً نامنظم هستند، اما با انحراف شکستگی کار انجام شده در امتداد مسیر شکست کاهش یافته است. بنابراین، شکست برشی در حین گسترش شکستگی در نتیجه انتخاب بهترین مسیرهای گسترش ایجاد می‌شوند.

شکست برشی می‌تواند شرایط مناسب را برای گسترش شکست‌های بعدی ایجاد کند. همچنین می‌توان در فرآیند شکست با انتخاب زاویه مناسب بین شکاف‌های از پیش موجود و تنش افقی حداکثر با استفاده از ترک‌های برشی، ترک‌های مناسب در اطراف حفره تزریق در فرآیند شکافت هیدرولیکی ایجاد کرد.

تحلیل b-value و Ib-value

b-value نمایانگر حوادث ضعیف و قوی است و ایجاد ریزترک باعث ترک خوردگی با مقدار b-value بالا می‌شود و ایجاد ماکروترک باعث ترک خوردگی با مقدار b-value کم می‌شود. وقتی تنش افزایش می‌یابد ریزترک‌ها به‌سمت به هم آمیختگی پیش می‌روند، و با افزایش تنش تا نقطه شکست، مقدار b-value کم می‌شود b-value معمولاً در زلزله‌شناسی کاربرد گسترده دارد و به‌صورت منفی و از نمودار لگاریتمی-خطی بین فرکانس زلزله و بزرگی آن به‌دست می‌آید (تعداد زلزله‌های بزرگتر از یک زلزله مشخص)، رابطه گوتنبرگ-ریشتر برای زلزله‌شناسی به‌صورت رابطه ۱ می‌باشد [۲۹].

$$Log_{10}(N) = a - b\,M \qquad (۱)$$

a و b ثوابتی هستند که به وضعیت تکتونیکی محدوده وابسته‌اند، M بزرگی زلزله و N تعداد زلزله‌های با بزرگی بیشتر از M در محدوده مورد نظر بیان می‌شود. b-value برای انتشار آوایی معمولاً از رابطه گوتنبرگ-ریشتر که بین فرکانس تجمعی و بزرگی زلزله است به‌دست می‌آید که به‌صورت زیر است [۲۹]:

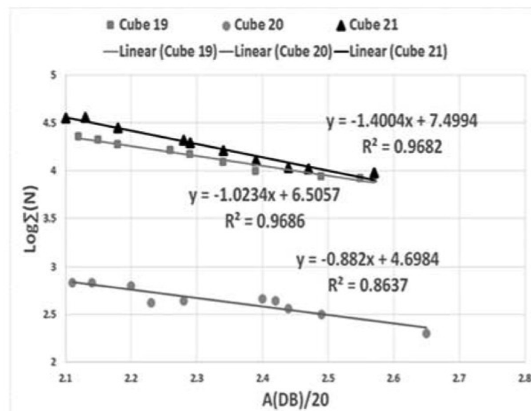
$$Log_{10}(N) = a - b\left(\frac{A_{dB}}{20}\right) \qquad (۲)$$

که در آن a و b ثوابتی هستند که به وضعیت ترک خوردگی نمونه وابسته‌اند و A_{dB} دامنه سیگنال‌های ناشی از ایجاد رخدادها و N تعداد رخدادهای با دامنه بیشتر از A_{dB} می‌باشد، که تغییر ثوابت a و b در نمونه‌های مورد نظر بررسی شده است. مقدار b-value برروی مجموعه‌ای از ۵۰ رخداد از داده‌های AE ثبت شده انجام می‌شود، زیرا ادبیات گزارش شده نشان می‌دهد که تعداد رخدادها باید بین ۵۰ تا ۱۰۰ باشد (فرهیدزاده و همکاران) [۳۰]. مقدار Ib-value یک پارامتر است که از داده‌های توزیع دامنه AE محاسبه می‌شود، که شامل فیلتر کردن AE با دامنه بالا و پایین به شیوه‌ای انتخابی است [۲۹]. از آن‌جایی که توزیع دامنه AE در طول آزمایش متفاوت است، مقادیر آماری مانند میانگین و انحراف استاندارد هر مجموعه دامنه در نظر گرفته می‌شود. شیوتانی و همکاران با در نظر گرفتن حدودی برای دامنه رابطه b-value بهبود یافته (اصلاح شده) را ارائه داده‌اند که برای ارزیابی روند شکست نمونه استفاده می‌شود و Ib-value به‌صورت زیر محاسبه می‌شود [۳۱]:

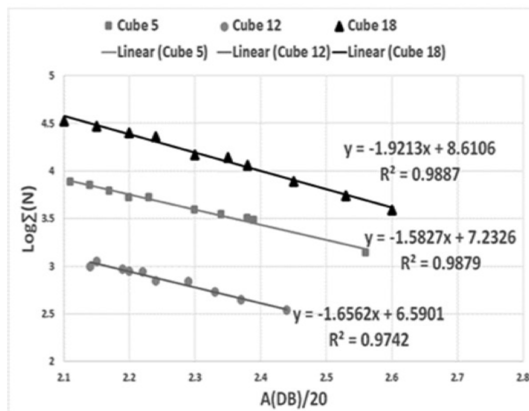
$$Ib = \frac{Log_{10}(N(\mu+\alpha_1\sigma)) - Log_{10}(N(\mu-\alpha_2\sigma))}{\sigma(\alpha_1+\alpha_2)} \qquad (۳)$$

که در آن μ میانگین توزیع دامنه، σ انحراف استاندارد و α_1 و α_2 ثابت‌هایی هستند که توسط کاربر تعریف می‌شود که نشان‌دهنده ضرایب کران پایین و بالای دامنه هستند. مقادیر b-value برای نمونه‌های شکاف‌دار در مقابل نمونه‌های بدون شکاف در شکل ۱۲ ذکر شده است. همچنین، مقادیر Ib-value به‌همراه فشار تزریق سیال در طول زمان آزمایش در شکل ۱۳ برای نمونه‌های بدون شکاف و شکاف‌دار نشان داده شده است. دامنه حداکثر AE مربوط به بزرگی ترک‌های ایجاد شده در حین شکستگی است. ریزترک‌ها رویدادهای AE با دامنه پایین ایجاد می‌کنند، درحالی‌که ماکروترک‌ها رویدادهای AE با دامنه بالاتر ایجاد می‌کنند. برای تعیین شکستگی کلی براساس دامنه حداکثر، از مقدار b-value استفاده می‌شود و به‌عنوان مقدار مطلق شیب توزیع تجمعی دامنه رویدادهای AE تعریف می‌شود. بنابراین، نمونه‌های شکاف‌دار تعداد رخدادهای منتهی به سیگنال AE کمتری نسبت به نمونه‌های بدون شکاف دارند. در اثر وجود شکاف‌های از پیش موجود، شکنندگی نمونه‌های شکاف‌دار کمتر شده است.

الف) نمونه‌های شکاف‌دار

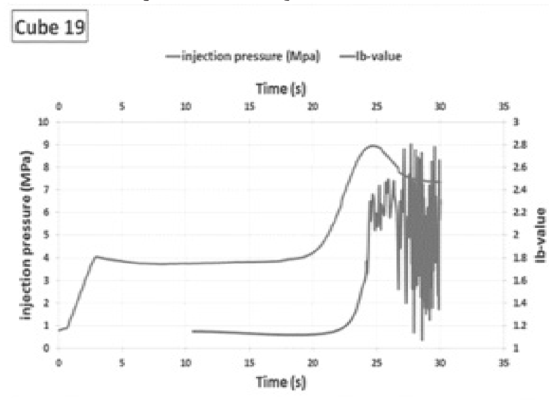


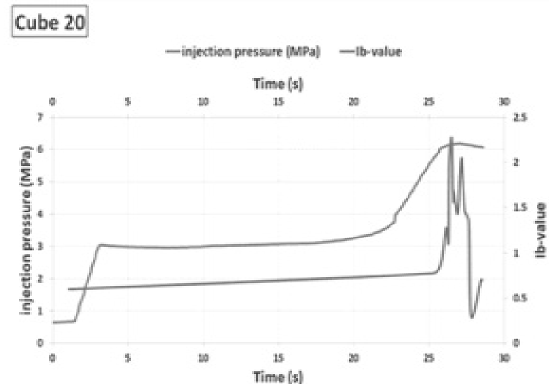
ب) نمونه‌های بدون شکاف

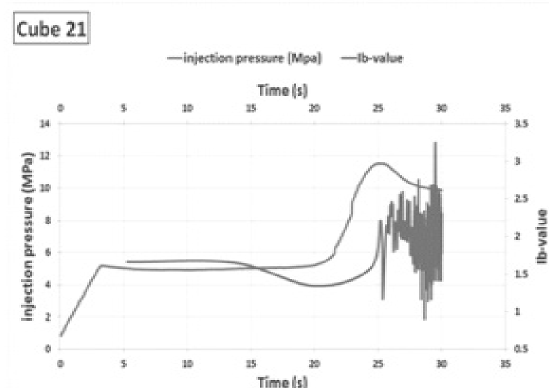


شکل ۱۲ مقادیر b-value برای آزمایش شکافت هیدرولیکی: الف) نمونه‌های شکاف‌دار و ب) نمونه‌های بدون شکاف

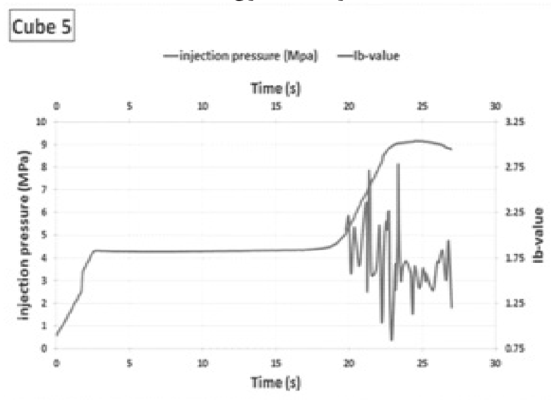
الف) نمونه‌های شکاف‌دار

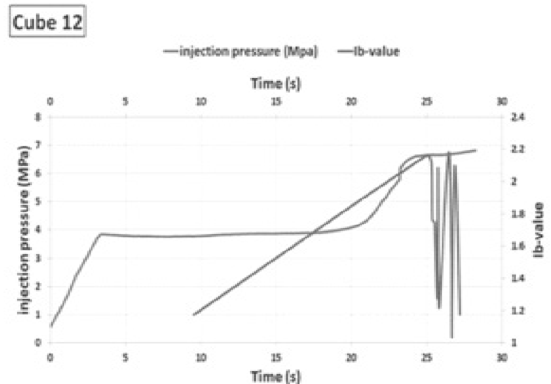


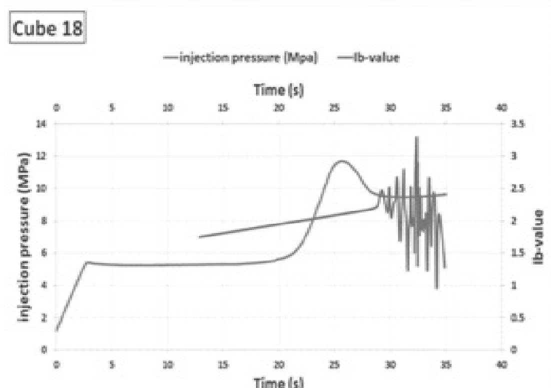




ب) نمونه‌های بدون شکاف







شکل ۱۳ نمودار تغییرات مقدار Ib-value و فشار تزریق سیال: الف) نمونه‌های شکاف‌دار و ب) نمونه‌های بدون شکاف.

و ایـن به‌دلیـل ریزترک‌هایـی اسـت کـه در اثـر ایجـاد شـکاف‌های از پیـش موجـود ایجـاد شـده‌اند و رخدادهـای AE را در طـول آزمایـش کاهـش داده‌انـد. شـیب خطـوط بـرای نمونه‌هـای شـکاف‌دار کمتـر از نمونه‌هـای بـدون شـکاف اسـت. پایین بـودن b-value نمونه‌هـای شـکاف‌دار نشـان می‌دهـد کـه ریزترک‌هـای بیشـتری در ایـن نمونه‌هـا به‌وجـود آمـده اسـت. ریزترک‌هـا دارای انـرژی کمتـری هسـتند ولـی تعـداد زیـاد آن‌هـا باعـث بـالا بـودن انـرژی تجمعـی AE در نمونه‌هـای شـکاف‌دار می‌شـود. در نمونه‌هـای شـکاف‌دار ماکروترک‌هـای کمتـری نسـبت بـه نمونه‌هـای بـدون شـکاف به‌وجـود آمـده اسـت و احتمـال به‌وجـود آمـدن حـوادث قـوی و شکسـت‌های شـکننده کمتـر اسـت. شـکاف از پیـش موجـود فشـار شکسـت نمونه‌هـا را کاهـش داده و هندسـه شکسـت نمونه‌هـای شـکاف‌دار بـا نمونه‌هـای بـدون شـکاف کامـلاً متفـاوت اسـت. بـرای نمونه‌های بـدون شـکاف فرآینـد شکسـتگی تحت تأثیـر رویدادهـای ریزتـرک قبـل از حداکثـر فشـار تزریـق اسـت و شکسـت شـکننده به‌طـور ناگهانـی در لحظـه حداکثـر فشـار تزریـق رخ داده اسـت. بـرای نمونه‌هـای شـکاف‌دار ریزترک‌هـا از مراحـل ابتدایـی تزریـق سـیال شـروع شـده و در لحظـه شکسـت، ماکروترک‌هـا ایجـاد می‌شـوند کـه منجـر بـه آزاد شـدن انـرژی کرنـش ذخیـره شـده و کاهـش فشـار شکسـت شـده‌اند. قبـل از حداکثـر فشـار تزریـق سـیال، تـرک کششـی بـر میـدان تنـش در نمونه‌هـا غالـب اسـت و در لحظـه حداکثـر فشـار تزریـق ترک‌هـای برشـی در نمونه‌هـا افزایـش می‌یابنـد تـا زمانـی کـه شکسـت نمونـه رخ بدهـد و تـرک برشـی در شکسـت نمونه‌هـا تأثیـر زیـادی دارد. قبـل از ایجـاد ماکروترک‌هـا در نمونه‌هـا، رویدادهـای AE بـا دامنه‌هـای پاییـن وجـود دارد و مقـدار b-value نسـبتا بـالا اسـت. هنگامی‌کـه ماکروتـرک رخ می‌دهـد، رویدادهـای AE بـا دامنـه بـالا و b-value پاییـن ظاهـر می‌شـوند و انـرژی کرنـش ذخیـره شـده آزاد می‌شـود کـه منجـر بـه انتشـار امـواج الاسـتیک بـا دامنه‌هـای بـالا و مقـدار b-value پاییـن شـده اسـت. در نمونه‌هـای بـدون شـکاف زمانی‌کـه فشـار تزریـق بـه مقـدار حداکثـر می‌رسـد، رویدادهـای تـرک خوردگـی ماکـرو بـا آزاد شـدن سـریع انـرژی ذخیـره شـده رخ می‌دهنـد و مقـدار b-value بـه شـدت کاهـش می‌یابـد. شـکاف از پیـش موجـود در دیـواره حفـره مرکـزی نمونه‌هـای شـکاف‌دار به‌شـدت بـر فرآینـد تغییـرات b-value تأثیـر می‌گـذارد. مقـدار b-value براسـاس پارامترهـای AE می‌توانـد بـرای پیش‌بینـی رویدادهـای بـزرگ مقیـاس در طـول فرآینـد شـکافت هیدرولیکـی نمونه‌هـای شـکاف‌دار اسـتفاده شـود. بـا توجـه بـه شکل ۱۳، مقدار Ib-value در نزدیکـی حداکثـر فشـار تزریـق کاهـش می‌یابـد و سـپس در ناحیـه پس از نقطـه حداکثـر فشـار تزریـق به‌شـدت نوسـان می‌کنـد. بنابرایـن شکسـتگی در مقیـاس کوچـک بـا فرکانس‌هـای بـالا عمدتـا تـا نقطـه حداکثـر فشـار تزریـق ایجـاد می‌شـود، سـپس شکسـتگی‌های مقیـاس بـزرگ بـا فرکانـس پایین‌تـر در نزدیکـی حداکثـر فشـار تزریـق ایجـاد می‌شـوند. مقـدار Ib-value بـرای نمونه‌هـای شـکاف‌دار در زمـان کمتـری فعـال شـده اسـت و در مراحـل اولیـه تزریـق سـیال b-value شـروع شـده اسـت. بـرای نمونه‌هـای بـدون شـکاف b-value در مراحـل میانـی تزریـق سـیال شـروع بـه فعالیـت کـرده اسـت کـه دلیـل آن می‌توانـد حضـور ریزترک‌هـا باشـد کـه در نمونه‌هـای شـکاف‌دار به‌دلیـل وجـود شـکاف از پیـش موجـود بـه محـض شـروع تزریـق سـیال ریزترک‌هایـی در نمونه‌هـا ایجـاد شـده و باعـث شـروع نوسـان b-value شـده‌اند. b-value بـرای نمونه‌هـای شـکاف‌دار زودتـر شـروع بـه نوسـان کـرده اسـت، ولـی نوسـانات آن بـرای نمونه‌هـای بـدون شـکاف بالاتـر اسـت و نوسـانات زیادتـر b-value بـرای نمونه‌هـای بـدون شـکاف انفجـار ناگهانـی رشـد تـرک را نسـبت بـه نمونه‌هـای شـکاف‌دار نشـان داده اسـت. در نمونه‌هـای شـکاف‌دار، شـکاف از پیـش موجـود بـا حـذف تمرکـز تنـش اطـراف چـال و ایجـاد ریزترک‌هـای بیشـتر باعـث می‌شـود b-value به‌طـور پیوسـته‌تری نوسـان کنـد و نسـبت رویدادهـای AE کوچـک و بـزرگ در سـطح پایدارتـری حفـظ شـوند.

نتیجه‌گیری

در ایـن تحقیـق، مطالعـه آزمایشـگاهی تأثیـر شـکاف از پیـش موجـود بـر شـکافت هیدرولیکـی، آزمایش‌هـای شـکافت هیدرولیکـی تحـت شـرایط تنـش سـه محـوره واقعـی بـرای نمونه‌هـای دارای شـکاف و بـدون شـکاف به‌همـراه رفتارنـگاری انتشـار آوایـی انجـام شـده اسـت. اهـم نتایـج حاصـل از ایـن تحقیـق در ادامـه بیـان شـده اسـت. چنانچـه ملاحظـه شـد، شـکاف از پیـش موجـود در نمونه‌هـای شـکاف‌دار فشـار شکسـتگی نمونه‌هـا را کاهـش داده و مقـدار اختـلاف تنش‌هـای جانبـی بـه وضـوح مسـیر گسـترش تـرک را در طـول آزمایـش شـکافت هیدرولیکـی تحـت تأثیـر قـرار داده اسـت. همچنیـن در نمونه‌هـای دارای شـکاف، مقـدار شـمارش AE نسـبت بـه نمونه‌هـای بـدون شـکاف بالاتـر بـوده و تعـداد زیـادی رویـداد AE و مقـدار شـمارش زیـادی در لحظـه حداکثـر فشـار تزریـق مشـاهده شـده اسـت. از نظـر گسـترش تـرک، شـکاف از پیـش موجـود باعـث انحـراف تـرک شـده و ایـن انحـراف تـرک باعـث افزایـش کار انجـام شـده در نمونه‌هـا شـده و به‌دنبـال آن سـیگنال‌های AE بیشـتری دریافـت شـده اسـت. در فرآینـد انجـام آزمایـش، در طـول زمـان تزریـق سـیال ترک‌هـای کششـی و برشـی در نمونه‌هـای شـکاف‌دار بیشـتر از نمونه‌هـای بـدون شـکاف اسـت. ترک‌هـای برشـی بیشـتری در نمونه‌هـای شـکاف‌دار ایجـاد شـده اسـت و به‌دنبـال آن دارای انـرژی تجمعـی AE بالاتـری هسـتند و دلیـل آن انحـراف تـرک و شکسـت نامنظـم در ایـن نمونه‌هـا اسـت. در ارتبـاط بـا پارامتـر تحلیـل b-value، ایـن پارامتـر بـرای نمونه‌هـای شـکاف‌دار پایین‌تـر بـوده و ریزترک‌هـای بیشـتری در ایـن نمونه‌هـا به‌وجـود آمـده و احتمـال رخـداد انتشـار آوایـی قـوی و شکسـت‌های شـکننده کمتـر اسـت. همچنیـن در نمونه‌هـای شـکاف‌دار، شـکاف از پیـش موجـود بـا حـذف تمرکـز تنـش اطـراف چـال و ایجـاد ریزترک‌هـای بیشـتر، باعـث نوسـان پیوسـته‌تر Ib-value می‌شـود و برخـلاف نمونه‌هـای بـدون شـکاف کـه انفجـار ناگهانـی رشـد تـرک بیشـتر اسـت، در نمونه‌هـای شـکاف‌دار نسـبت رویدادهـای AE کوچـک و بـزرگ در سـطح پایدارتـری قـرار دارنـد.

تشکر و قدردانی

بدین‌وسـیله از گـروه مکانیـک سـنگ دانشـکده معـدن، نفـت و ژئوفیزیـک دانشـگاه صنعتـی شـاهرود و همچنیـن از کمک‌هـای همـکاران در طـول انجـام ایـن تحقیـق تشـکر و قدردانـی می‌شـود.

مراجع

[1]. Ma Z (2000) Experimental studies of rock fracture behavior related to hydraulic fracture, MSc Thesis, University of Illinois at Chicago.

[2]. Hossain M M, Rahman M K, Rahman S S (2000) Hydraulic fracture initiation and propagation: roles of wellbore trajectory, perforation and stress regimes, Journal of Petroleum Science and Engineering, 27, 3-4: 129-149.

[۳]. مـرادی ا، تخـم چـی ب، رسـولی و، فاتحـی مرجـی م (۱۳۹۵) تحلیـل المـان مـرزی غیـر مسـتقیم اندرکنش شـکافت هیدرولیکـی و شکسـت طبیعـی در مخـازن هیدروکربنـی درزه دار. روش‌هـای تحلیلـی و عـددی در مهندسـی معـدن، ۶ ۱۱: ۸۸-۷۷.

[۴]. نقـی دهقـان ع، گشتاسـبی ک، آهنگـری ک، جیـن ی، میسـکیمینس ج (۱۳۹۴) مکانیسـم شـروع و گسـترش شکسـت بـا اسـتفاده از یـک سیسـتم آزمایـش شـکافت هیدرولیکـی سـه محـوره بـرروی نمونه‌هایـی از بلوک‌هـای سـیمانی. پژوهـش نفـت، ۲۵، ۲-۸۵: ۱۹۸-۱۸۰

[5]. Nikkhah M, Ahmadi M, Ghazvinian A (2011) Application of pattern recognition analysis of rock acoustic emission for determination of Kaiser Effect, Proceedings of 12th International Congress on Rock Mechanics, China, 765-769.

[6]. Hampton J C (2012) Laboratory hydraulic fracture characterization using acoustic emission, MSc Thesis, Colorado School of Mines.

[7]. Li Q B (2015) Acoustic emissions in hydraulic fracturing of Barre granite. Doctoral dissertation, Massachu

setts Institute of Technology.
[8]. Veatch Jr R W, Moschovidis Z A, Fast C R (1989) An overview of hydraulic fracturing. Recent Advances in Hydraulic Fracturing, 12: 1-38.
[9]. Valkó P, Economides M J (1995) Hydraulic fracture mechanics, Chichester: Wiley 28.
[10]. Stanchits S, Surdi A, Edelman E, Suarez-Rivera R (2012) Acoustic emission and ultrasonic transmission monitoring of hydraulic fracture propagation in heterogeneous rock samples, 46th US Rock Mechanics /Geomechanics Symposium, OnePetro.
[11]. Alabbad E A (2014) Experimental investigation of geomechanical aspects of hydraulic fracturing unconventional formations, The University of Texas at Austin.
[12]. Stoeckhert F, Molenda M, Brenne S, Alber M (2015) Fracture propagation in sandstone and slate–Laboratory experiments, acoustic emissions and fracture mechanics, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 7, 3: 237-249.
[13]. Stanchits S, Burghardt J, Surdi A (2015) Hydraulic fracturing of heterogeneous rock monitored by acoustic emission, Rock Mechanics and Rock Engineering, 48, 6: 2513-2527.
[14]. Zhao Z, Li X, WangY, Zheng B, Zhang B (2016) A Laboratory study of the effects of interbeds on hydraulic fracture propagation in shale formation, Energies, 9, 7: 556.
[۱۵]. شیرازی ح (۱۳۹۵). مدل‌سازی آزمایشگاهی فرآیند شکافت هیدرولیکی در شرایط تنش سه محوره واقعی. رساله دکتری، دانشگاه صنعتی شاهرود.
[16]. Mao R, Feng Z, Liu Z, Zhao Y (2017) Laboratory hydraulic fracturing test on large-scale pre-cracked granite specimens, Journal of Natural Gas Science and Engineering, 44: 278-286.
[17]. Ning L, Shicheng Z, Yushi Z, Xinfang M, Shan W, Yinuo Z (2017) Experimental analysis of hydraulic fracture growth and acoustic emission response in a layered formation, Rock Mechanics and Rock Engineering, 51, 4: 1047-1062.
[18]. Xinfang M A, Ning, L I, Congbin, Y I N, Yanchao L, Yushi Z, Shan W, Tong Z H O U (2017) Hydraulic fracture propagation geometry and acoustic emission interpretation: A case study of Silurian Longmaxi Formation shale in Sichuan Basin, SW China, Petroleum Exploration and Development, 44, 6: 1030-1037.
[19]. Liang Y, Cheng Y, Zou Q, Wang W, Ma Y, Li Q (2017) Response characteristics of coal subjected to hydraulic fracturing: An evaluation based on real-time monitoring of borehole strain and acoustic emission, Journal of Natural Gas Science and Engineering, 38: 402-411.
[20]. Li N, Zhang S, Zou Y, Ma X, Zhang Z, Li S, Sun Y (2018) Acoustic emission response of laboratory hydraulic fracturing in layered shale, Rock Mechanics and Rock Engineering, 51, 11: 3395-3406.
[21]. Naoi M, Chen Y, Nishihara K, Yamamoto K, Yano S, Watanabe S., Ishida T (2018) Monitoring hydraulically-induced fractures in the laboratory using acoustic emissions and the fluorescent method, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 104: 53-63.
[22]. Zhuang L, Kim K Y, Jung S G, Diaz M, Min K B, Zang A, Hofmann H (2019) Cyclic hydraulic fracturing of pocheon granite cores and its impact on breakdown pressure, acoustic emission amplitudes and injectivity, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 122: 104065.
[23]. Wang J, Guo Y, Zhang K, Ren G, Ni J (2019) Experimental investigation on hydraulic fractures in the layered shale formation, Geofluids.
[24]. Jiang Z, Li Q, Hu Q, Liang Y, Xu Y, Liu L, Ling F (2020) Acoustic emission characteristics in hydraulic fracturing of stratified rocks: a laboratory study. Powder Technology, 371: 267-276.
[25]. Vallen Systeme, GmbH (2020).http://www.vallen.de, Wolfratshausen, Germany: The Acoustic Emission Company.
[26]. Grosse C U, Ohtsu M (2008) Acoustic emission testing, Springer Science and Business Media.
[27]. Sagar R V (2021) A probabilistic model of acoustic emissions generated during compression test of cementitious materials for crack mode classification, Indian Journal of Engineering and Materials Sciences (IJEMS), 27, 3: 537-553.
[28]. Zhang H, Wang Z, Song Z, Zhang Y, & Zhao W (2021) Acoustic emission characteristics of different brittle rocks and its application in brittleness evaluation, Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 7, 2: 1-14.
[29]. Rao M V M S, Lakshmi K P (2005) Analysis of b-value and improved b-value of acoustic emissions accompanying rock fracture, Current Science, 1577-1582.
[30]. Farhidzadeh A, Salamone, S, Luna B, Whittaker A (2013) Acoustic emission monitoring of a reinforced concrete shear wall by b-value–based outlier analysis, Structural Health Monitoring, 12, 1: 3-13.
[31]. Shiotani T (2001) Application of the AE improved b-value to quantiative evaluation of fracture process in concrete-materials, Journal of Acoustic Emission, 19: 118-133.

پیش‌بینی مدت‌زمان تعمیر تجهیز پمپ اصلی روان‌کاری با استفاده از منطق فازی و شبکه عصبی- فازی و به‌دست آوردن دسترس‌پذیری و شاخص‌های آن با استفاده از مدل شبیه‌سازی مونت کارلو در سیستم‌های تولید توان

دانش میرزایی[1]، علی بهبهانی نیا[2]، اشکان عبدالی سوسن[1,3] و سید محمدرضا میری لواسانی[1]

۱- دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، واحد علوم تحقیقات،دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- گروه مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشگده مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

۳- گروه فنی و مهندسی واحد آستارا، دانشگاه آزاد اسلامی، آستارا، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۰۲

چکیده

خرابی و تعمیر تجهیزات، نقش تعیین‌کننده‌ای در دسترس‌پذیری کل سیستم دارد. در پژوهش حاضر، به ارائه یک راهکار کاربردی جهت تحلیل زمان تعمیر تجهیزات و پیش‌بینی رفتار تجهیز پرداخته شده است. جهت تخمین زمان خرابی و مدت‌زمان تعمیر تجهیزات، از تجربه فرد متخصص استفاده گردیده است؛ لذا این پژوهش، برروی تخمین زمان تعمیر و نرخ تعمیر تجهیز پمپ اصلی روان‌کاری در سیستم تولید توان توربین گازی با رویکرد وارد نمودن تجربه انسانی تمرکز نموده است. در مرحله بعد، یک تحلیل پیش‌بینی دسترس‌پذیری سالیانه تجهیز در یک بازه زمانی ۲۰ ساله انجام گرفته که بدین ترتیب، سال‌های بحرانی تجهیز از نظر مدت‌زمان خرابی با ارزیابی و بررسی دسترس‌پذیری سالیانه مشخص می‌شود. برای این هدف، با استفاده از منطق فازی، از یک پایگاه دانش و تجربه انسانی جهت برآورد مدت‌زمان‌های تعمیر استفاده شده و با طراحی یک سیستم عصبی-فازی، کل زمان‌های تعمیر شبیه‌سازی شده است؛ که جهت تخمین و پیش‌بینی زمان تعمیر تجهیز به‌کار برده شده است. در ادامه، با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو، دسترس‌پذیری سالیانه، نرخ تعمیر وابسته به‌زمان و سایر شاخص‌های دسترس‌پذیری محاسبه شده است. مدل هدف، پمپ اصلی سیستم روغن‌کاری واحد توربین گازی پالایشگاه آبادان در ایران است. بررسی نتایج به‌دست‌آمده، نشان می‌دهد که اعمال تعمیرات پیش‌گیرانه در بازه‌های زمانی بهینه ۱۵۰ تا ۱۶۰ روزه، تأثیر به‌سزایی در افزایش دسترس‌پذیری تجهیز داشته و منجر به کاهش بازرسی‌های دوره‌ای اضافی می‌گردد. همچنین حداقل دسترس‌پذیری سیستم، ۹۶٪ و حداکثر ۹۹٪ پیش‌بینی شده است.

کلمات کلیدی: منطق فازی، شبکه فازی-عصبی تطبیقی، تابع عضویت، دسترس‌پذیری، قابلیت اطمینان

*مسؤول مکاتبات
آدرس الکترونیکی alibehbahaninia@kntu.ac.ir
شناسه دیجیتال: (DOI:10.22078/PR.2022.4769.3140)

مقدمه

صنعت انرژی، نقش به‌سزایی در توسعه اجتماعی و اقتصادی و تکنولوژیکی کشور دارد. هر تلاشی که منجر به توسعه قابلیت اطمینان و دسترس‌پذیری در سیستم‌های تولید توان و انرژی شود، تأثیر به‌سزایی در پایداری اقتصادی و اجتماعی جامعه دارد. اقدامات بسیاری در زمینه روش‌های تعمیرات در تجهیزات تولید و توزیع توان و انرژی انجام شده و همه آن‌ها براساس اتخاذ استراتژی بهینه در تعمیرات و افزایش قابلیت اطمینان و دسترس‌پذیری سیستم بوده است که مهم‌ترین آن‌ها، تعمیرات بر مبنای قابلیت اطمینان می‌باشد. در ارتقای شاخص‌های قابلیت اطمینان و دسترس‌پذیری، مطالعات فراوانی انجام شده است. یک مطالعه، به بررسی قابلیت اطمینان در سیستم‌های تولید توان توربین‌های گازی در نیروگاه‌ها پرداخته است [۱]. خرابی تجهیزات توزیع، مهم‌ترین چالش پیش روی اپراتورها بوده که دسترس‌پذیری شبکه تأمین را با مشکل جدی مواجه می‌کند. درخصوص نرخ خرابی در تجهیزات، یک بررسی ریشه‌ای علل خرابی[۱] (RCA) انجام شده است [۲ و ۳]. نرخ خرابی تجهیزات و توصیف نوع خرابی، توسط اوردا ارائه شده است [۲]. روش فرآیندی مارکو[۲]، جهت سیستم‌های تعمیرپذیر به‌کار برده می‌شود؛ اما در این روش ، برای تجهیزات تعمیرپذیر، محدودیت‌هایی وجود دارد که با وارد نمودن نرخ تعمیر متغیر با زمان، حل نمودن روابط دیفرانسیل مارکو پیچیده و غیرممکن می‌شود. در این حالت، استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو[۳] مفید است. بورگانوف و همکاران، یک روش شبیه‌سازی مونت کارلو را جهت ارزیابی سناریوهای تعمیرات توسعه داده‌اند [۴]. مطالعه‌ای دیگر نیز از روش مونت کارلو جهت به‌دست آوردن دسترس‌پذیری در نیروگاه‌های سیکل ترکیبی بهره جسته است [۵]. نرخ خرابی و نرخ تعمیر، دو شاخص بسیار مهم در برآورد شاخص‌های دسترس‌پذیری هستند و نقش اساسی در قابلیت اطمینان و دسترس‌پذیری تجهیزات دارند. برای سیستم‌های تعمیرپذیر موازی، یک آنالیز قابلیت اطمینان با احتساب نرخ خرابی متغیر با زمان انجام شده است [۶]. درخصوص تعمیرات بر پایه قابلیت اطمینان با هدف کاهش زمان خرابی و زمان تعمیر، تحقیقاتی انجام گرفته است [۷ و ۸]. علی‌رغم توسعه روش‌های نوین در زمینه تعمیرات و نگهداری که در سیستم‌های تولید توان پیاده‌سازی شده است، ازآنجایی‌که تعمیرات تجهیز تابع فاکتورهای زیادی بوده و این فاکتورها غالباً کیفی نیز هستند، به‌دست آوردن زمان تعمیر تجهیز، کار دشواری بوده و به همین دلیل، اتخاذ یک تصمیم مؤثر در زمان تعمیر تجهیز جهت برآورد دقیقی از میزان زمان مورد نیاز جهت تعمیر، از جانب اپراتورها تابه‌حال یک چالش اساسی می‌باشد. منطق فازی، راه‌حل مناسبی جهت دست‌یابی به‌زمان تعمیر تجهیزات است و با وارد کردن تجربه انسانی، عدم قطعیت‌های موجود در برآورد زمان تعمیر را پوشش می‌دهد. مطالعات زیادی درخصوص وارد نمودن منطق فازی در زمینه تعمیرات و شاخص‌های قابلیت اطمینان انجام شده است. یک مطالعه، در زمینه تشخیص اجزای بحرانی انجام شده است [۹]. یک سیستم کمکی تصمیم‌گیرنده فازی جهت مدیریت تعمیرات اجزای بحرانی ارائه شده است [۱۰]. مطالعه‌ای دیگر نیز از منطق فازی جهت بررسی ریسک در تعمیرات استفاده نموده است [۱۱]. اساساً منطق فازی، در برگیرنده دانش انسانی بوده که توانایی بیان نمودن فاکتورهای تعمیرات در غالب توابع زبانی[۴] را دارا است و سیستم‌های فازی، در تشخیص و یافتن عیوب یا موارد تعمیری در سیستم‌های مهندسی قادر هستند [۱۲ و ۱۳]. منطق فازی، جهت ارزیابی ریسک و قابلیت اطمینان به‌کار برده شده است [۱۴ و ۱۵].

1. Root Cause Analysis
2. Markov
3. Monte Carlo
4. Linguistic Functions

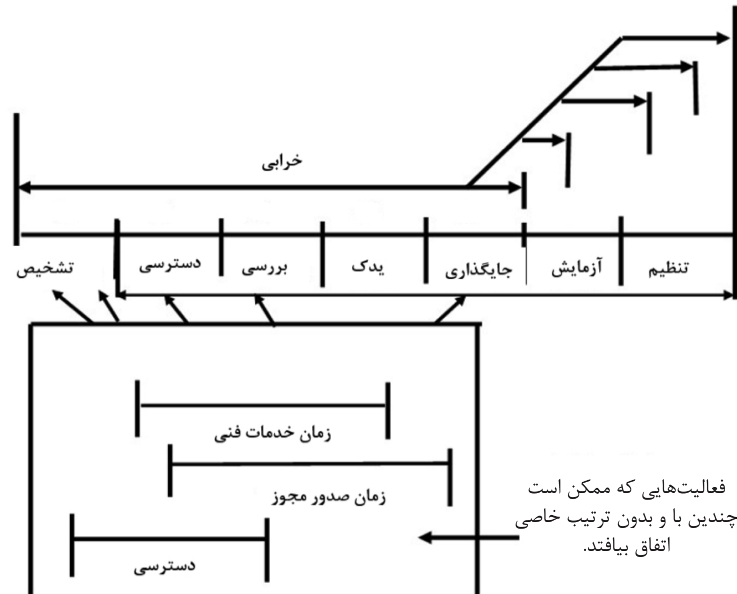
در غیاب داده‌های تعمیرات و به‌دلیل عدم قابلیت محاسبه عددی فاکتورهای تعمیرات، منطق فازی می‌تواند بسیار مفید واقع شود. شنگ و همکاران، یک مدل را که قابلیت مشخص نمودن ریسک‌های اصلی دارد، معرفی نموده‌اند که شامل دلایل وقوع ریسک و فاکتورهای دخیل در آن است [۱۶]. تلاش‌های زیادی جهت توسعه سیستم‌ها و روشهایی که بتوانند مدل‌های غیرخطی و پیچیده را بدون نیاز به پیش‌دانش انجام دهند، انجام شده است. شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANNs) که بر مبنای داده هستند، از این‌گونه هستند؛ اما به‌دلیل نبود نقش دانش انسانی در شبکه‌های عصبی مصنوعی، مبنای محاسبات صرفاً براساس داده‌های عددی است. جهت رفع این نقیصه، با وارد نمودن دانش انسانی در شبکه‌های عصبی، یک سیستم عصبی-فازی تطبیقی به وجود آمده که مزایای شبکه عصبی و سیستم‌های فازی را در بر دارد [۱۷]. در ابتدا، مدل فازی تاکاگی- سوگینو[1] ارائه شد که عملکرد بهتری نسبت به شبکه‌های عصبی بازگشتی (RNNs)[2] و مدل‌های رایج داشت [۱۸]. یک فرم خاص از مدل تاکاگی-سوگینو در سیستم‌های فازی-عصبی، سیستم فازی عصبی تطبیقی یا ANFIS[3] است [۱۹]. یک مطالعه جهت بررسی عیوب در توربین‌های بادی از ANFIS مدل فازی تاکاگی_سوگینو استفاده نموده است [۲۰]. بررسی جامعی در رابطه با رویکردهای آموزشی با استفاده از ANFIS انجام شده است [۲۱]. در واقع، ANFIS یک روش مؤثر است که سیستم‌های استنتاجی را جهت مشخص نمودن سیستم‌های غیرخطی و پیچیده همچون برآورد مدت زمان تعمیر به‌کار می‌برد که قابلیت پیش‌بینی سیستم‌های غیرخطی پیچیده را دارد و توانایی یادگیری و آموزش یک ساختار ورودی-خروجی را براساس دانش انسانی دارا است. در این مقاله با توجه به عدم محاسبه نرخ تعمیر وابسته به‌زمان تجهیز و با توجه به فقدان مطالعات کافی جهت دخیل نمودن فاکتورهای تعمیر در برآورد نهایی زمان تعمیر تجهیزات، از منطق فازی جهت استفاده از دانش انسانی در بیان فاکتورهای تعمیر جهت محاسبه زمان تعمیر تجهیزات استفاده شده است. با توجه به کیفی بودن عوامل تعمیر، توابع زبانی در منطق فازی، بهترین مدل جهت احتساب تمامی عوامل دخیل در زمان تعمیر تجهیز به‌همراه عدم قطعیت‌های مربوطه هستند. با توجه به اینکه در تمامی مطالعات، نرخ تعمیر تجهیزات ثابت فرض شده و در مطالعات قبلی محاسبه دسترس‌پذیری تجهیزات از حالت پایا بدون در نظر گرفتن عمر تجهیز استفاده شده است، به عقیده نگارنده، یک فقدان تحقیقاتی درخصوص محاسبه‌زمان تعمیر در شرایط مختلف فاکتورهای تعمیر و برآورد نرخ تعمیر وابسته به‌زمان تجهیز و دسترس‌پذیری سالیانه به‌عنوان تابعی از زمان عملیاتی تجهیز وجود دارد. در مقاله حاضر، در جهت پر نمودن این خلأ سعی شده است. وارد نمودن تجربه انسانی در برآورد زمان تعمیر و بررسی رفتار تعمیر و پیش‌بینی زمان تعمیر با استفاده از سیستم عصبی-فازی یا ANFIS، از نکات بارز این مطالعه بوده که با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو، امکان محاسبه و پیش‌بینی نرخ تعمیر وابسته به‌زمان تجهیز و دسترس‌پذیری سالیانه را در طول عمر عملیاتی تجهیز فراهم می‌نماید و با محاسبه و پیش‌بینی شاخص‌های دسترس‌پذیری در مدل شبیه‌سازی مونت کارلو، امکان برنامه‌ریزی و کاهش هزینه‌های زمانی و مالی را برای اپراتورها و اکیپ‌های تعمیرات، فراهم می‌آورد. در واقع، پیش‌بینی زمان خرابی، مدت‌زمان مورد نیاز تعمیر تجهیز و دسترس‌پذیری سالیانه، از دستاوردهای مهم این مقاله بوده که نتیجه استفاده از سیستم‌های فازی و مدل شبیه‌سازی مونت کارلو در این تحقیق است.

1. Tagaki-Sugeno
2. Recurrent Neural Network
3. Adaptive Neuro Fuzzy Inference System

مدل پیشنهادی و روش کار

سیستم استنتاجی منطق فازی (FIS) [1]

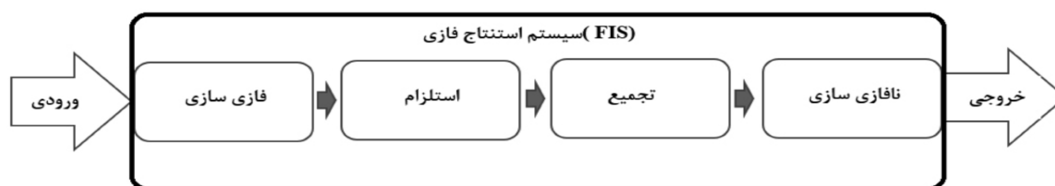
ازآنجایی‌که فاکتورهای اصلی تعمیر غالباً کیفی هستند، توابع زبانی در منطق فازی، قابلیت وارد نمودن این فاکتورها را در محاسبه نهایی زمان تعمیر تجهیز، دارا است. این فاکتورها در شکل ۱ نشان داده شده است [۲۲]. در واقع محاسبات زمان تعمیر، براساس فاکتورهای تعمیر قابل انجام بوده و این فاکتورها مطابق شکل ۱ عبارت‌اند از: زمان تشخیص[2]، زمان بررسی[3]، زمان دسترسی، زمان جهت تأمین قطعه یدک و جای‌گذاری[4]، زمان لازم جهت استفاده از یدکی موجود در محل[5]، زمان آزمایش فنی تجهیز و زمان تنظیم و هم‌راستایی[6]. تعمیرات، نه‌تنها دارای رفتار پیچیده‌ای هست، بلکه پیش‌بینی زمان مورد نیاز تعمیر نیز بسیار سخت می‌باشد؛ زیرا تابع عوامل مختلفی بوده و دارای رفتار غیرخطی و ناپایدار تصادفی است. اولین بار، لطفی‌زاده تئوری فازی را گسترش داد و منطق فازی براساس تئوری او است [۲۳]. ئوری از توابع زبانی، توابع عضویت و یک‌سری قوانین فازی بهره می‌برد و مجموعه فازی نامیده می‌شود [۲۴-۲۶]. مطابق تئوری لطفی‌زاده، توابع زبانی منطق فازی، بهترین روش جهت بیان فاکتورهای تعمیر است [۲۳،۲۷ و ۲۸]. اساس کار منطق فازی، مطابق شکل ۲، شامل چهار مرحله است: فازی‌سازی ورودی‌هااز طریق توابع عضویت و تشکیل قواعد فازی، ارزیابی قوانین و تعیین درجه صحت قوانین فازی[7]، جمع‌آوری نتایج[8] و در نهایت نافازی‌سازی[9] خروجی [۲۹]. انتخاب نوع توابع عضویت و گستره این توابع، جهت تعریف توابع زبانی و فازی‌سازی متغیرهای تعمیر از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۲۴].



شکل ۱ فاکتورهای اصلی تعمیر یک تجهیز.

1. Fuzzy Inference System
2. Realization Time
3. Diagnosis Time
4. Spare Part and Replacement Time
5. Procurement Time
6. Alignment Time
7. Implication
8. Aggregation
9. Defuzzification

پژوهش نفت شماره ۱۲۶، آذر و دی ۱۴۰۱، صفحه ۵۶-۳۸



شکل ۲ اساس کار سیستم منطق فازی (موتور استنتاج فازی)

به‌دلیل تغییرات هموار و ملایم تابع گوس و شباهت این تابع به تابع توزیع نرمال، در بخش فازی‌سازی فاکتورهای تعمیر، از تابع عضویت گوس استفاده شده که رابطه آن مطابق رابطه ۱ است [۲۹]. جهت صحت‌سنجی و ارزیابی قواعد فازی، از استلزام ممدانی از نوع کمینه[1] استفاده شده است. عموماً در صورت استفاده از استلزام ممدانی در سیستم‌های فازی، این سیستم‌ها به‌عنوان سیستم فازی ممدانی شناخته می‌شوند؛ لذا از سیستم فازی ممدانی جهت به‌دست آوردن زمان تعمیر تجهیزات نیروگاه استفاده می‌گردد.

$$gaussian\ \mathrm{MF}(x,m,\delta)=e^{-\frac{1}{2}(\frac{x-m}{\delta})^2} \quad (۱)$$

تابع عضویت گوس، در رابطه ۱ توسط دو فاکتور {m, δ} مشخص می‌گردد که m بیان‌کننده مقدار میانگین یا مرکز تابع عضویت و δ نیز نشان‌دهنده واریانس یا میزان پهنای تابع عضویت گوسی است. همان‌طور که گفته شد، یک سیستم فازی شامل چهار مرحله بوده که در شکل ۲ نشان داده شده است. گزاره‌های منطقی که به قوانین فازی مشهور هستند، از دو بخش "مقدم" و "تالی" تشکیل شده‌اند که توسط اپراتورهای منطقی به‌صورت زیر تعریف می‌گردند:

IF<مقدم>Then<تالی>

"مقدم"، مجموعه‌ای از توابع عضویت فاکتورهای تعمیر تجهیز است که توسط اپراتورهای منطقی تعریف گردیده‌اند و "تالی"، برآیند این فاکتورها بوده که بیان‌کننده وضعیت زمانی تعمیر است و درجه صحت این رابطه یا قانون توسط استلزام ممدانی تعیین می‌شود. ورودی‌ها، شامل هفت فاکتور تعمیر هستند که نقش اساسی در تخمین زمان تعمیر تجهیز را دارا هستند. مجموعه فازی ورودی و خروجی، در جداول ۱ و ۲ ارائه شده که بیان‌کننده مشخصات توابع عضویت و عبارت‌های زبانی مربوط به فاکتورهای تعمیر است؛ به‌عنوان مثال، زمان تشخیص عیب با عبارت (Delay)،(On Time) و (Late) بیان شده است که عبارت زبانی "On Time" بیان‌کننده تشخیص سریع خرابی تجهیز بوده و تأثیر زیادی در زمان تعمیر تجهیز ندارد؛ درحالی‌که "Late" بیان‌کننده صرف مدت‌زمان بیشتری بوده و در برآورد زمان کلی تعمیر تجهیز تأثیرگذار است. جدول ۲، مشخصات توابع زبانی خروجی فازی را ارائه می‌کند و شکل‌های ۳ (الف-ز)، توابع عضویت گوسی را برای هفت فاکتور تعمیر در تجهیز نشان می‌دهد و مجموعه فازی نامیده می‌شوند؛ که شکل ۳ (ح) تابع عضویت مدت‌زمان تعمیر تجهیز را ارائه می‌دهد. این توابع عضویت و متغیرهای زبانی مربوطه و بازه هرکدام از آن‌ها، براساس تجربیات متخصصان و مختص همان تجهیز به‌دست آمده و قابلیت بازتولید برای تجهیزات مشابه در مکان‌های دیگر را ندارد؛ اما فرآیند منطق فازی و ANFIS جهت تخمین زمان تعمیر برای تمامی تجهیزات یکسان است. سایر مشخصات سیستم فازی در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است. در واقع این مجموعه‌های فازی برای تجهیز و سایر اجزاء زیرسیستم تعمیرپذیر تجهیز بر پایه اسناد فنی، تاریخچه تعمیرات و تجربه و دانش انسانی طراحی شده‌اند. جهت تخمین زمان‌های تعمیر تجهیز، سیستم منطق فازی شامل ورودی‌هایی است که براساس آن‌ها قوانین فازی پایه‌گذاری می‌شوند.

1. Mamdani Iplication

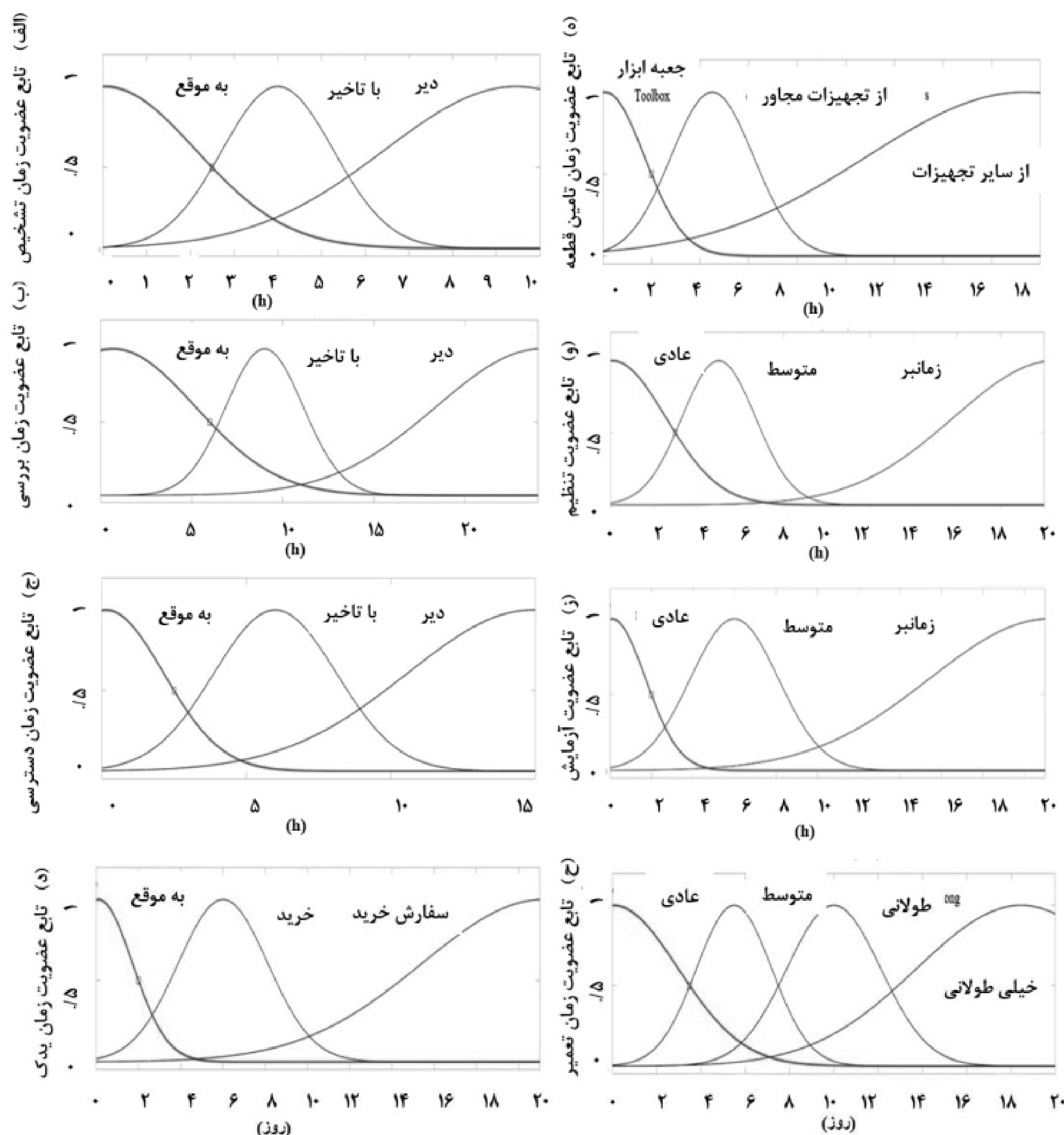
جدول ۱ مشخصات متغیرهای زبانی ورودی به سیستم منطق فازی.

استلزام	تابع عضویت	توابع زبانی	متغیرهای ورودی
ممدانی	گاوس	به موقع	زمان تشخیص
	گاوس	با تاخیر	
	گاوس	دیر	
ممدانی	گاوس	به موقع	زمان بررسی
	گاوس	با تاخیر	
	گاوس	دیر	
ممدانی	گاوس	به موقع	زمان دسترسی
	گاوس	با تاخیر	
	گاوس	دیر	
ممدانی	گاوس	به موقع	زمان تامین قطعه یدک و جای‌گذاری
	گاوس	خرید	
	گاوس	شفارس خرید	
ممدانی	گاوس	جعبه ابزار	زمان تامین یدک از سایت
	گاوس	از تجهیزات مشابه	
	گاوس	از سایر تجهیزات در سایت	
ممدانی	گاوس	عادی	زمان آزمایش
	گاوس	متوسط	
	گاوس	زمانبر	
ممدانی	گاوس	عادی	زمان هم‌راستایی و تنظیم
	گاوس	متوسط	
	گاوس	زمانبر	

جدول ۲ مشخصات متغیر زبانی خروجی سیستم فازی (زمان تعمیر تجهیز).

روش نافازی‌سازی	روش تجمیع	نوع تابع عضویت	توابع زبانی	متغیرهای خروجی
Bisector	جمع	گاوس	عادی	زمان تعمیر(روز)
		گاوس	متوسط	
		گاوس	طولانی	
		گاوس	بسیار طولانی	

پژوهش نفت شماره ۱۲۶، آذر و دی ۱۴۰۱، صفحه ۵۶-۳۸



شکل ۳ توابع عضویت فاکتورهای تعمیر تجهیز و زمان نهایی تجهیز: الف) زمان تشخیص، ب) زمان بررسی، ج) زمان دسترسی، د) زمان تأمین قطعه و جای‌گذاری، ه) زمان تأمین یدکی از تجهیزات مجاور، و) زمان تنظیم و همراستایی، ز) زمان آزمایش نهایی و ح) کل زمان تعمیر تجهیز.

این ورودی‌ها بردار ورودی $X=[x_1,x_2,...,x_7]$ را تشکیل می‌دهند که منجر به خروجی فازی b می‌گردد. قوانین فازی، توسط روابط ۲ و ۳ ارائه شده که به‌عنوان سیستم استنتاج فازی ممدانی شناخته می‌شود و شامل دو بخش مقدم یا FP_i و تالی یا FP_b است.

$$Rule^r : \text{if } x_1 \text{ is } A_1^r \text{ and} \ldots x_7 \text{ is } A_7^r \text{ then } b \text{ is } b^r \quad (۲)$$

$$\text{if} < FP_1 \text{ and } FP_2 \text{ and} \ldots \text{and } FP_n > \text{then} < FP_b > \quad (۳)$$

در روابط ۲ و ۳ $A_1^r,A_2^r,...,A_7^r$ مقادیر زبانی، فاکتورهای تعمیر هستند که توسط توابع عضویت تعیین می‌شوند. b نیز خروجی سیستم فازی بوده و r تعداد قوانین فازی است. این مقادیر در رابطه ۳ به‌صورت خلاصه نشان داده شده است که FP_1، FP_2 ، FP_n...، و FP_b مقدم و تالی‌های سیستم

فـازی بـا n ورودی اسـت. خروجـی فـازی، بـه مقادیـر حقیقـی تبدیـل می‌گـردد و همان‌گونـه کـه گفتـه شـد، از روش Bisector جهـت نافازی‌سـازی خروجـی اسـتفاده می‌شـود. اسـتلزام ممدانـی توسـط روابـط زیـر تعریـف می‌گـردد [۲۹]:

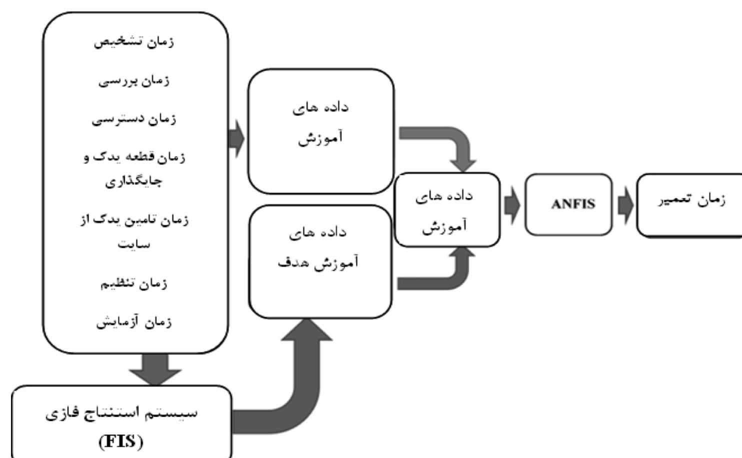
$$\text{Mamdani minimum} = \min[\mu_{\tilde{A}_1^r} \ldots \mu_{\tilde{A}_7^r}, \mu_{b^r}] \quad (۴)$$

$$\text{Mamdani minimum} = \min [\mu_{FP_1}(x_1), \mu_{FP2}(x_2), \ldots \mu_{FPn}(x_n), \mu_{FPb}(x_b)] \quad (۵)$$

کـه در رابطه‌هـای ۴ و ۵، $\mu_{\tilde{A}_r^i}$ و μ_b^r بیان‌کننـده قـدرت توابـع عضویـت در مقـدم و تالـی اسـت.

سیستم شبکه عصبی-فازی تطبیقی (ANFIS) [۱]

یـک الگوریتـم جهـت آمـوزش داده‌هـای به‌دسـت‌آمده از سیسـتم اسـتنتاج فـازی جهـت پیش‌بینـی زمـان تعمیـر تجهیـزات در آینـده براسـاس داده‌هـای به‌دسـت‌آمده از زمـان تعمیـر و فاکتورهـای تعمیـر بسـیار کارآمـد اسـت؛ الگوریتمـی کـه بتوانـد علاوه‌بـر دارا بـودن مزایـای سیسـتم فـازی، قابلیـت شبیه‌سـازی زمـان تعمیـر و تطبیـق بـا انـواع سـناریوهای خرابـی و تعمیـر تجهیز را داشـته باشـد. در ایـن صـورت، می‌تـوان بـا شبیه‌سـازی رفتـار مدت‌زمـان تعمیـر تجهیـز، به‌راحتـی بـا وارد نمـودن داده‌هـای عـددی فاکتورهـای تعمیـر، زمـان تعمیـر تجهیـز را به‌دسـت آورد. سیسـتم‌های عصبـی-فـازی تطبیقـی یـا ANFIS، قابلیـت یادگیـری رفتارهـای پیچیـده بـا دانـش قبلـی سیسـتم را هم‌زمـان دارا هسـتند [۲۱]. ورودی بـه ANFIS فاکتورهـای تعمیـر و زمـان تعمیـر تجهیـز اسـت کـه به‌عنـوان بـردار داده‌هـای آمـوزش شـناخته می‌شـود. داده‌هـای آمـوزش، شـامل دو بخـش داده‌هـای آمـوزش ورودی و داده‌هـای آمـوزش هـدف می‌باشـد. داده‌هـای آمـوزش ورودی، شـامل هفـت فاکتـور تعمیـر مطابـق شـکل ۱ اسـت. داده‌هـای آمـوزش هـدف، زمـان تعمیـر تجهیـز بـوده کـه زمـان تعمیـر تجهیـز نیـز قبلاً از سیسـتم فـازی منتـج گردیـده بـود. شـکل ۴، چهارچـوب اصلـی فرآینـد آمـوزش و پیش‌بینـی زمـان تعمیـر را در ایـن مقالـه نشـان می‌دهـد. در نهایـت، خروجـی ANFIS، بیان‌کننـده مقادیـر شبیه‌سازی‌شـده رفتـار زمـان تعمیـر اسـت. ایـن خروجـی، براسـاس شبیه‌سـازی زمـان تعمیـر تجهیـز بـا اسـتفاده از الگوریتم‌هـای آمـوزش و بهینه‌سـازی خطـا به‌دسـت آمـده اسـت. داده‌هـای آمـوزش (داده‌هـای ورودی و هـدف)، بـه سیسـتم ANFIS وارد می‌شـود و جهـت تشـکیل سـاختار اولیـه سیسـتم فـازی (FIS) از الگوریتـم FCM- clustering اسـتفاده می‌گـردد. درواقـع سیسـتم آمـوزش و فـازی، به‌صـورت هم‌زمـان در ANFIS وجـود دارد کـه بعـد از آمـوزش و بهینه‌سـازی فرآینـد، خروجـی ANFIS زمان‌هـای پیش‌بینی‌شـده تعمیـر تجهیـز براسـاس داده‌هـای آمـوزش (فاکتورهـای تعمیـر تجهیـز و زمـان تعمیـر) اسـت.



شکل ۴ چهارچوب اصلی استفاده از سیستم فازی و ANFIS در شبیه‌سازی زمان تعمیر تجهیز.

1. Mamdani Iplication

پژوهش نفت شماره ۱۲۶، آذر و دی ۱۴۰۱، صفحه ۵۶-۳۸

شکل ۵، چهارچوب اصلی ANFIS را نشان می‌دهد که شامل ۵ لایه فازی‌سازی، استلزام، نرمال‌سازی، نافازی‌سازی و جمع نتایج است. این سیستم، جهت شبیه‌سازی و پیش‌بینی زمان تعمیر تجهیزات نیروگاه به‌کار برده می‌شود. این زمان پیش‌بینی‌شده توسط ANFIS، جهت پیش‌بینی دسترس‌پذیری تجهیزات توسط مدل شبیه‌سازی مونت کارلو در بخش بعد مورد استفاده قرار می‌گیرد. در واقع ANFIS، یک الگوریتم آموزش سیستم فازی است. شکل ۶، ساختار ANFIS را برای حالت دو ورودی نشان می‌دهد. در فرآیند یادگیری و آموزش ساختار اولیه سیستم فازی ANFIS از نوع sugeno انتخاب شده است. برای لایه‌های ۳، ۴ و ۵ روابط زیر را داریم [۲۹]:

$$\overline{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2} \quad (۶)$$

$$Y = \overline{w}_i y_i = (P_i x + q_i y + r_i) \quad (۷)$$

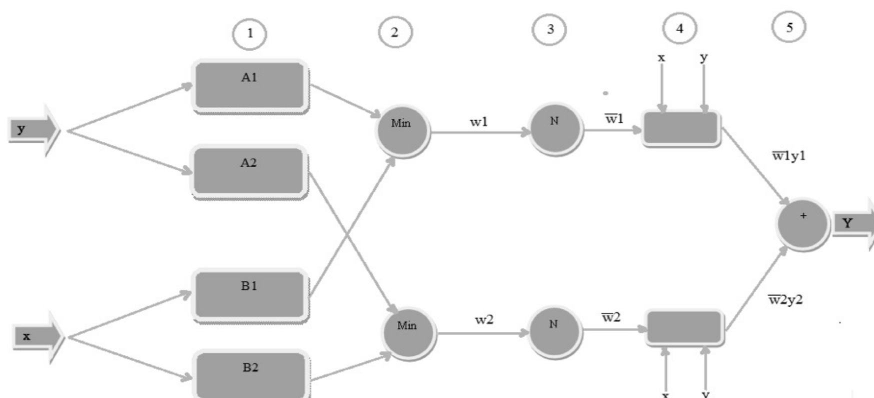
در روابط ۶ و ۷، $\overline{w}_i$ خروجی‌های نرمال‌شده را در لایه سوم شکل ۶ بیان می‌نماید و $\{p_i, q_i, r_i\}$ پارامترهای آن هستند [۲۹]. خروجی نهایی، از جمع کردن تمامی سیگنال‌های ورودی به‌دست می‌آید که مطابق رابطه ۸، در لایه پنجم این عمل انجام می‌گیرد [۲۹].

$$\text{final outputs} = \frac{\sum_i w_i y_i}{\sum_i w_i} \quad (۸)$$

برای ورودی‌های بیشتر نیز همین روند انجام می‌شود و روش FCM- clustering و الگوریتم بهینه‌سازی گرادیان کاهشی[۱] جهت آموزش توابع عضویت سیستم فازی و مینیمم کردن خطای آموزش به‌کار برده می‌شود. داده‌های خروجی ANFIS که با عنوان داده‌های آموزش‌دیده شناخته می‌شوند، با داده‌های هدف آموزش (TT) تطبیق داده می‌شوند و خطای بین این دو مقدار توسط روش بهینه‌سازی گرادیان کاهشی بهینه می‌شود. بردار داده‌های آموزش (TDV) در تجهیز پمپ روان‌کاری نیروگاه گازی شامل دو مولفه است: بردار فاکتورهای تعمیر (RF) که به بردار داده‌های آموزش (TI) شناخته می شود و بردار دوم مدت زمان تعمیر تجهیز (TR) است که بخشی از این داده‌ها جهت آموزش وارد ANFIS شده و داده‌های آموزش (TD) نامیده می‌شوند که پس از طی فرآیند آموزش و بهینه‌سازی، داده‌های آموزش‌دیده را نتیجه می‌دهند.



شکل ۵ اساس کار سیستم عصبی-فازی تطبیقی (ANFIS)



شکل ۶ ساختار سیستم عصبی فازی از نوع مرتبه اول Sugeno با دو ورودی

1. Gradian Descend Algorithm

بخش دیگری از داده‌های آموزش، جهت تست فرآیند آموزش انتخاب می‌شود که داده‌های تست (TSD) نامیده می‌شوند. در واقع داده‌های تست، فرآیند آموزش را آزمایش می‌نماید. مقادیر داده‌های آموزش و تست، در روابط ۱۳-۹ نشان داده شده است.

$$TI = v_1 = [RF] \quad (۹)$$

$$TT = v_2 = [TR] \quad (۱۰)$$

$$TDV = [v_1 \; v_2] \quad (۱۱)$$

$$TD = a[TDV], 0 < a < 1 \quad (۱۲)$$

$$TSD = (1-a)[TDV] \quad (۱۳)$$

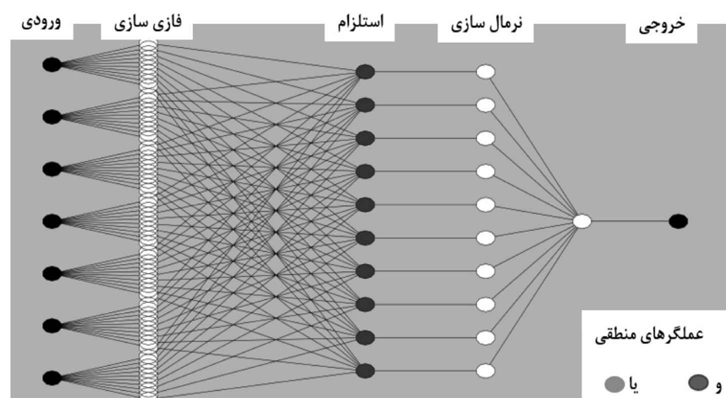
برای ایجاد ساختار اولیه سیستم فازی (FIS) در ANFIS، از Fuzzy c-means (FCM) clustering استفاده می‌شود. با تشکیل قواعد فازی، رفتار داده‌ها مدل‌سازی می‌شود که داده‌های آموزش در رابطه ۱۲به‌عنوان آرگومان‌های ورودی در روش FCM-clustering به‌کار برده می‌شود. روش آموزش Fuzzy c-means (FCM) clustering، نسبت به سایر روش‌ها نظیر subtractive clustering and grid partitioning در ANFIS، نتایج بهتری با صرف زمان کمتر ارائه می‌نماید. در شکل ۷، ساختار ANFIS با تعداد ۱۰ cluster برای پمپ روغن‌کاری سیستم روان‌کاری و خنک‌کاری نیروگاه گازی در واحد تولید توان نشان داده می‌شود که ورودی همان داده‌های آموزش در رابطه ۱۲ است. با افزایش تعداد Clusterها، تعداد قوانین فازی افزایش می‌یابد و فرآیند آموزش و شبیه‌سازی، از دقت نسبی بالاتر برخوردار خواهد بود که در این حالت مدت‌زمان آموزش نیز بالاتر می‌رود. جهت محاسبه انحراف مقادیر پیش‌بینی‌شده یا آموزش‌دیده از مقادیر هدف، از جذر میانگین مربعات خطا بین این دو مقدار استفاده می‌شود که با رابطه ۱۴ نشان داده شده است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(T(i)-o(i))^2}{n}} \quad (۱۴)$$

در رابطه ۱۴، هدف (T(i)) می‌توانـد داده‌های هدف آموزش یا داده‌های تست آموزش باشد و خروجی (O(i)) نیز به همین ترتیب داده‌های آموزش‌دیده خروجی یا تست خروجی است و n نیز تعداد داده‌ها می‌باشد.

مدل‌سازی مونت کارلو و محاسبه دسترس‌پذیری و شاخص‌های آن

با توجه به موجود بودن زمان تعمیر تجهیز که از منطق فازی و ANFIS به‌دست آمده و زمان خرابی نیز با داشتن نرخ خرابی تجهیزات از مراجع فنی موجود نظیر کتاب مرجع OREDA و سایر منابع دیگر قابل محاسبه می‌باشد [۲]. این امر، امکان محاسبه دسترس‌پذیری سیستم را فراهم می‌نماید. در سیستم‌های واقعی مهندسی، نرخ تعمیر ثابت نبوده و به‌صورت تابعی از زمان عملیاتی تجهیز می‌باشد. در تجهیزات و سیستم‌های مهندسی، نرخ تعمیر متغیر با زمان منطقی‌تر از نرخ خرابی متغیر با زمان است؛ زیرا نرخ خرابی تجهیزات با توجه



شکل ۷ ساختار ANFIS با سیستم فازی اولیه براساس FCM-clustering

به تعمیرات پیش‌گیرانه در طول زمان عملیاتی تعمیر، همواره در یک بازه ثابت قرار می‌گیرد؛ به این دلیل، نرخ خرابی تجهیزات به‌صورت ثابت و مستقل فرض می‌گردد [۲ و ۳۴-۳۰]. روش شبیه‌سازی مونت کارلو، جهت به‌دست آوردن دسترس‌پذیری تجهیزات مورد استفاده قرار می‌گیرد که بر پایه زمان خرابی و تعمیر تجهیزات است. به‌دلیل پیچیدگی روابط تحلیلی در مواقعی که حالات غیرپایدار این روابط مورد استفاده قرار می‌گیرد که تابعی از زمان‌های خرابی و تعمیرات هستند، عملاً حل نمودن این روابط بسیار مشکل و غیرممکن می‌شود؛ لذا استفاده از روش مونت کارلو در این حالت، بسیار راحت‌تر و نتایج نیز به نتایج واقعی بسیار نزدیک است. با این توضیحات، روش مونت کارلو، یک روش مناسب جهت برآورد دسترس‌پذیری سیستم است که به خاطر ماهیت تصادفی بودن تعمیر و خرابی در تجهیزات این روش با ایجاد تکرارهای تصادفی، امکان شبیه‌سازی زمان خرابی و تعمیر تجهیز را فراهم می‌نماید. در تکرارهای بالای روش مونت کارلو، مقادیر خرابی و تعمیر، به مقادیر واقعی و منطقی تجهیز نزدیک‌تر می‌شوند که امکان به‌دست آوردن دسترس‌پذیری تجهیز در طول دوره عملیاتی تجهیز فراهم می‌گردد [۳۵ و ۳۶]. در روش شبیه‌سازی مونت کارلو، جهت محاسبه دسترس‌پذیری تجهیزات، زمان‌های خرابی و تعمیر تجهیز، با تولید یکسری زمان‌های تصادفی در خرابی و تعمیر تجهیز، تخمین زده می‌شود این زمان‌ها از تابع توزیع تجمعی (CDF)[۱] خرابی و تعمیر تجهیز به‌صورت تصادفی استخراج می‌شوند. تابع توزیع تجمعی زمان‌های تعمیر، از سیستم فازی و ANFIS منتج گردیده است که در یک سیستم با اجزای تعمیرپذیر، از رابطه ۱۵ و ۱۶ قابل استخراج می‌باشد [۳۷].

$$m(t)\Delta(t) = P\{t \le \mathbf{t} \le t + \Delta t\} \quad (۱۵)$$

$$M(t) = CDF_{repair} = \int^{t} m(t)dt \quad (۱۶)$$

در رابطه ۱۵، m(t) تابع توزیع احتمال (PDF)[۲] تعمیر تجهیز بوده و m(t)Δ(t)، احتمال تعمیر تجهیز در بازه زمانی t و t+Δ(t) است [۳۷]. تابع توزیع احتمال از داده‌های تعمیر تجهیز که از سیستم فازی منتج شده به‌دست آمده است که این داده‌ها در توزیع نرمال قرار داده شده‌اند و تابع توزیع احتمال تعمیر تجهیز را ارائه می‌دهند. نرخ تعمیر تجهیز، توسط رابطه ۱۷ تعریف می‌گردد [۳۷]. محاسبه نرخ تعمیر از طریق رابطه تحلیلی ۱۷ بسیار مشکل است که در روش مونت کارلو، نرخ تعمیر سالیانه به‌مراتب راحت‌تر محاسبه می‌گردد.

$$\mu(t) = \frac{m(t)}{1 - M(t)} \quad (۱۷)$$

در روش مونت کارلو، زمان خرابی تجهیز[۳] یا مدت‌زمانی که تجهیز وارد مرحله ازکارافتادگی می‌شود، به‌وسیله تولید اعداد تصادفی از تابع توزیع تجمعی خرابی تجهیز به‌دست می‌آید که توسط روابط ۱۸ و ۱۹ تعریف می‌گردد [۳۷].

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (۱۸)$$

$$CDF_{failure} = 1 - R(t) \quad (۱۹)$$

در رابطه ۱۸، R(t) قابلیت اطمینان تجهیز می‌باشد که "λ" بیان‌کننده نرخ خرابی[۴] و t زمان عملیاتی تجهیز است. نتایج به‌دست‌آمده در سیستم مونت کارلو، از روش پیشنهادی بورگانوف بهتر است [۴]. رابطه تحلیلی دسترس‌پذیری توسط رابطه ۲۰ ارائه شده است [۳۷]. حل نمودن این رابطه، به‌دلیل وجود نرخ تعمیر که تابعی از زمان بوده، بسیار مشکل و پیچیده است؛ لذا با توجه به داده‌های خرابی و زمان تعمیر متناظر با خرابی که از روش شبیه‌سازی مونت کارلو به‌دست آمده، محاسبه دسترس‌پذیری سالیانه از رابطه ۲۱ انجام می‌گردد. در این رابطه، $A_m(t)$ دسترس‌پذیری در سال n، m تعداد تکرارها در مدل مونت کارلو و $\sum TR_m$ مجموع زمان‌های تعمیر (TTR)[۵] یا دسترس‌ناپذیری‌ها در سال m می‌باشد.

1. Cumulative Distribution Function
2. Probability Distribution Function
3. Time to Failure
4. Failure Rate
5. Time To Repair

$$\frac{d}{dt}A(t) = -(\lambda(t)+\mu(t))A(t)+\mu(t) \quad (۲۰)$$

$$A_m(t)=\frac{n\times 365-\sum TR_m}{n} \quad (۲۱)$$

در طول عمر فعالیت یک تجهیز، ممکن است بارها تجهیز دچار خرابی[1] شود که در طی مدت خرابی دستگاه، عملاً تجهیز از سرویس خارج می‌شود. مدت‌زمان مورد نیاز جهت اینکه تجهیز دوباره به سرویس برگردد تابع فاکتورهای مختلفی بوده که در شکل ۱، قبلاً نشان داده شده است؛ لذا براساس ISO-14224 مدت‌زمان‌هایی که تجهیز در سرویس بوده و همچنین مدت‌زمان مورد نیاز جهت بازگشت مجدد تجهیز به سرویس در لحظه خرابی تا تعمیر، در شکل ۸ نشان داده شده است. این زمان‌ها، شاخص‌های دسترس‌پذیری بوده و با عناوین MTTF[2]، MTTR[3] و MTBF[4] نشان داده شده است. MTTF، بیان‌کننده میانگین فعالیت تجهیز از زمان به سرویس آمدن تا خرابی بعدی (TTF)[5] تجهیز بوده و MTTR میانگین زمان تعمیر تجهیز در زمان خرابی و خارج از سرویس بودن دستگاه تا زمان تعمیر و در سرویس قرارگیری مجدد (TTR) است. رابطه ۲۲، رابطه بین این سه شاخص را بیان می‌کند [۳۸].

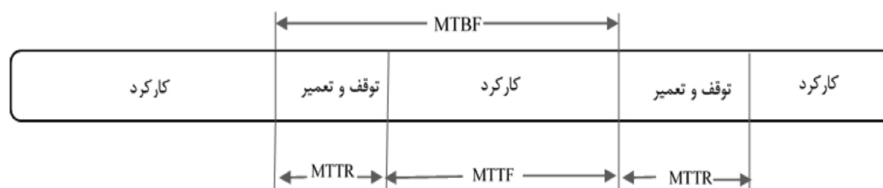
$$MTBF = MTTF + MTTR \quad (۲۲)$$

روش شبیه‌سازی مونت کارلو، جهت به‌دست آوردن شاخص‌های دسترس‌پذیری به‌کاربرده می‌شود؛ که شاخص‌های میانگین زمانی خرابی و میانگین زمانی بین خرابی‌های تجهیز، از رابطه‌های ۲۳ و ۲۴ قابل محاسبه است.

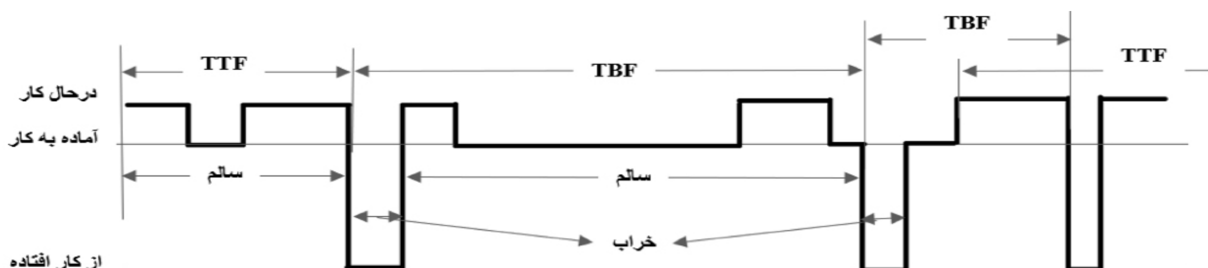
$$MTTR_m=\frac{\sum_0^m TR_m}{\sum_0^m NF(m)} \quad (۲۳)$$

$$MTBF_m=\frac{m\times 365}{\sum_0^m NF(m)} \quad (۲۴)$$

در روابط ۲۳ و ۲۴، m شماره سال، TR مدت زمان تعمیر و NF تعداد خرابی می‌باشد. لازم به ذکر است مطابق شکل ۹، در تجهیزاتی که به‌صورت دوره‌ای فعال هستند، مدت‌زمانی که دستگاه خاموش (غیرفعال) بوده، ولی آماده‌به‌کار می‌باشد[6] نیز جزئی از زمان MTTF محسوب می‌گردد. در برآورد دسترس‌پذیری کل سیستم، نحوه اتصال اجزا به همدیگر مهم است؛ که نمودار قابلیت اطمینان[7] (RBD) نشان‌دهنده نحوه اتصال اجزا به همدیگر می‌باشد.



شکل ۸ چرخه کارکرد یک تجهیز



شکل ۹ تفکیک زمان‌های مختلف در طول چرخه عمر یک تجهیز

1. Down Time
2. Mean Time To Failure
3. Mean Time To Repair
4. Mean Time Between Failures
5. Time To Failure
6. Stand-By
7. Reliability Block Diagram

پژوهش نفت شماره ۱۲۶، آذر و دی ۱۴۰۱، صفحه ۵۶-۳۸

در اتصال‌های سری یا متوالی، کارکرد سیستم منوط به‌کارکرد هم‌زمان اجزا بوده و در صورت خرابی هر عضو، سیستم دچار خاموشی کامل می‌شود؛ درحالی‌که در اتصالات موازی درصورتی‌که تمام اجزا دچار خرابی شوند، سیستم وارد مرحله خاموشی کامل می‌شود. شکل ۱۰، نحوه اتصال تجهیز در دو حالت سری و موازی را نشان می‌دهد. جهت محاسبه دسترس‌پذیری اتصالات موازی، از رابطه ۲۵ و برای محاسبه اتصالات سری از رابطه ۲۶ استفاده می‌گردد [۳۷].

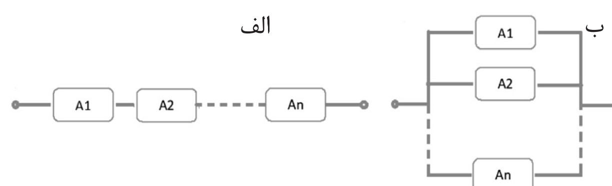
$$A_{Parallel}(t) = 1- \prod_{m}[1-A_m(t)] \quad (۲۵)$$

$$A_{series}(t)= \prod_{m} A_m(t) \quad (۲۶)$$

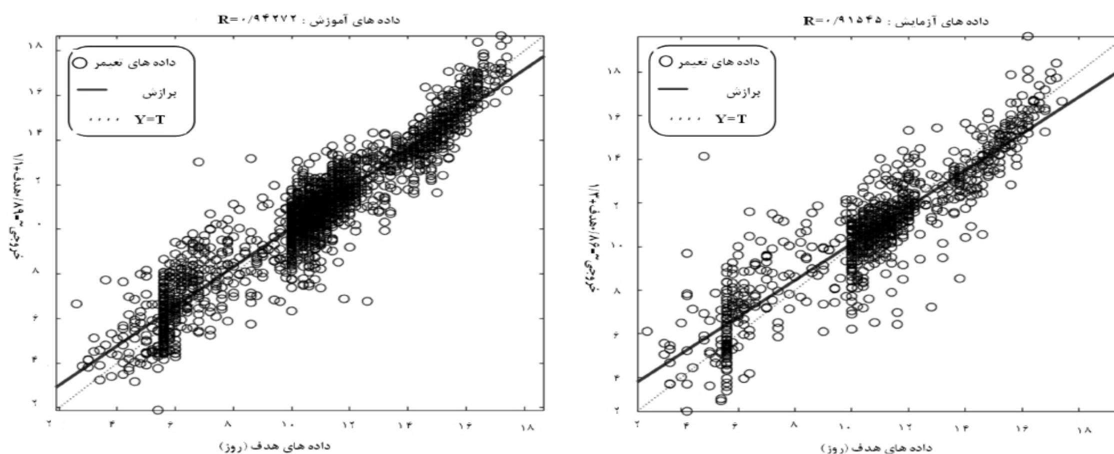
نتایج و بحث

بررسی زمان‌های تعمیر به‌دست‌آمده از منطق فازی و شبکه عصبی-فازی تطبیقی

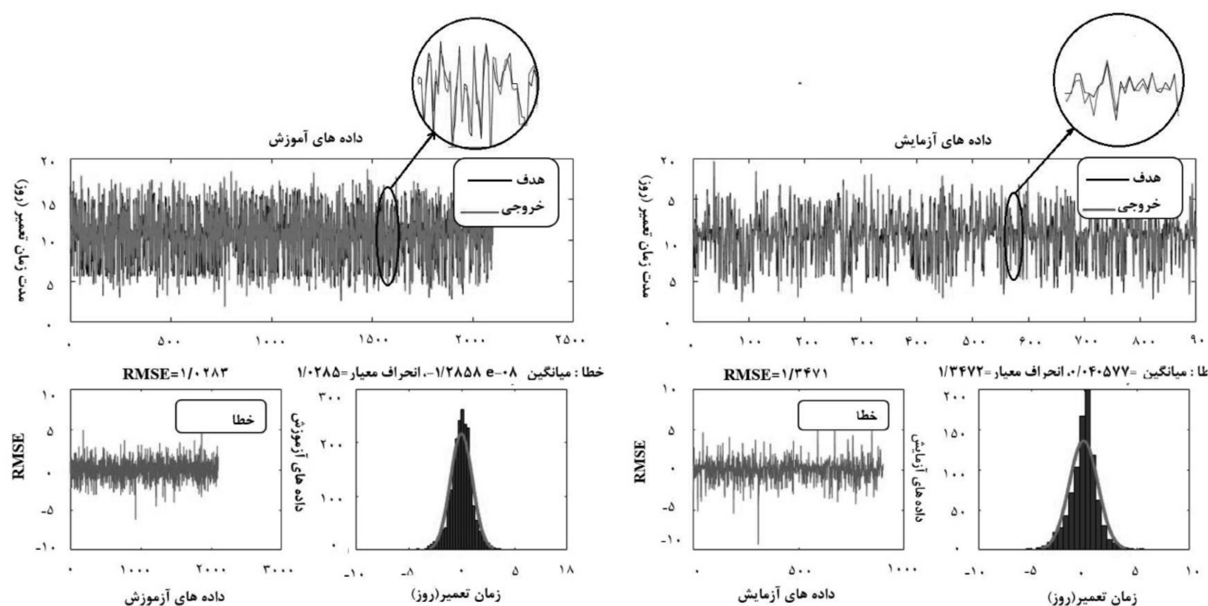
زمان تعمیر به‌دست‌آمده از منطق استنتاج فازی (FIS) و زمان تعمیرات پیش‌بینی‌شده آتی منتج‌شده از ANFIS، قابل گسترش به سایر تجهیزات مشابه در مکان‌های دیگر نبوده و صرفاً براساس تجربه انسانی، شرایط محیطی و کیفی، شرایط نصب و راه‌اندازی آن تجهیز بوده و مختص به خود تجهیز می‌باشد؛ زیرا تعمیرات تابع فاکتورهای کیفی از قبیل مهارت گروه تعمیر نگهداری، نحوه اجرای نگهداری و تعمیرات تجهیز و ... می‌باشد. زمان‌های تعمیر به‌دست‌آمده برای تجهیز، دربرگیرنده تمامی سناریوهای حین تعمیر بوده و تمامی فاکتورهای تعمیر را پوشش می‌دهد. در شکل ۱۱، خروجی ANFIS برای پمپ روغن‌کاری برازش خطی بین مقادیر آموزش و پیش‌بینی‌شده با مقادیر هدف آن‌ها نشان داده شده است؛ که میزان دقت آموزش داده‌های تعمیر و داده‌های پیش‌بینی‌شده در شکل ۱۲ با میزان خطای موجود نشان داده شده است.



شکل ۱۰ اتصال اجزا در سیستم براساس مدل قابلیت اطمینان (RBD) برای اجزاء با اتصال سری الف) و اجزاء با اتصال موازی ب)



شکل ۱۱ برازش خطی بین داده‌های هدف زمان تعمیر و مقادیر آموزش یافته و پیش‌بینی شده زمان تعمیر



شکل۱۲ توزیع خطا در داده‌های آموزش و پیش‌بینی شده زمان تعمیر و میزان دقت در آموزش داده‌ها و داده‌های پیش‌بینی شده

در شکل ۱۲، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، توزیع خطای داده‌های هدف و داده‌های پیش‌بینی‌شده نشان داده شده است. این توزیع خطا، در قالب توزیع نرمال نشان داده شده است. در نهایت، ANFIS یک مدل پیش‌بینی زمان تعمیر تجهیز را ارائه داده است.

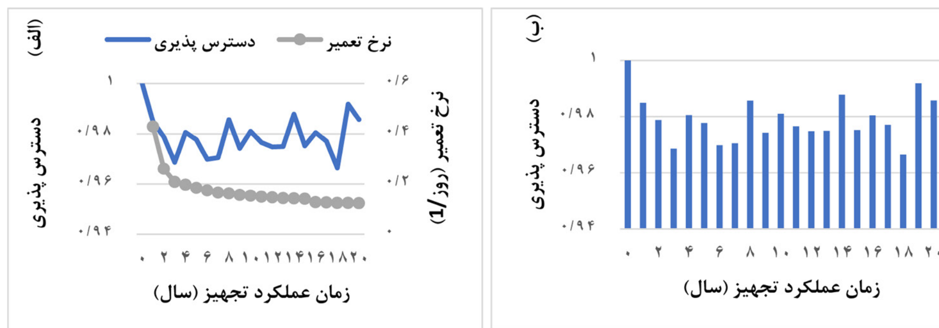
تحلیل دسترس‌پذیری و نرخ تعمیر تجهیز با استفاده از مدل شبیه‌سازی مونت کارلو

نرخ تعمیر تجهیز که معادل تعداد تعمیرات در روز می‌باشد، از مدل مونت کارلو به‌دست آمده که در شکل ۱۳ الف نشان داده شده است. در اوایل نصب و راه‌اندازی، به‌دلیل وجود خرابی‌های سطحی اولیه که ناشی از عدم نصب مناسب و شرایط راه‌اندازی اولیه است، تعداد خرابی‌ها زیاد بوده، اما زمان رفع خرابی به‌دلیل سطحی بودن خطا سریع‌تر است و با افزایش عمر تجهیز، خرابی به‌صورت تصادفی بوده و به‌دلیل رفع شدن خطاهای اولیه تجهیز، تعداد خرابی سال‌های بعد به‌مراتب کم‌تر ولی از نظر زمانی بیشتر طول می‌کشند. این رفتار در دسترس‌پذیری تجهیز را می‌توان در شکل ۱۳ ب مشاهده نمود که در سال‌های ابتدایی تجهیز با کاهش دسترس‌پذیری بیشتری مواجه می‌شود و با گذشت زمان، میزان دسترس‌پذیری روند صعودی و پایدارتری را خواهد داشت. با توجه به اینکه در سیستم روان‌کاری دو پمپ روغن در سیستم تولید توان توربین گازی به‌صورت موازی در حال کار هستند، لذا دسترس‌پذیری کل مربوط به دو پمپ موازی به‌صورت شکل ۱۴ می‌باشد که عملاً یکی از پمپ‌ها به‌صورت آماده به‌کار بوده و در سرویس نیست.

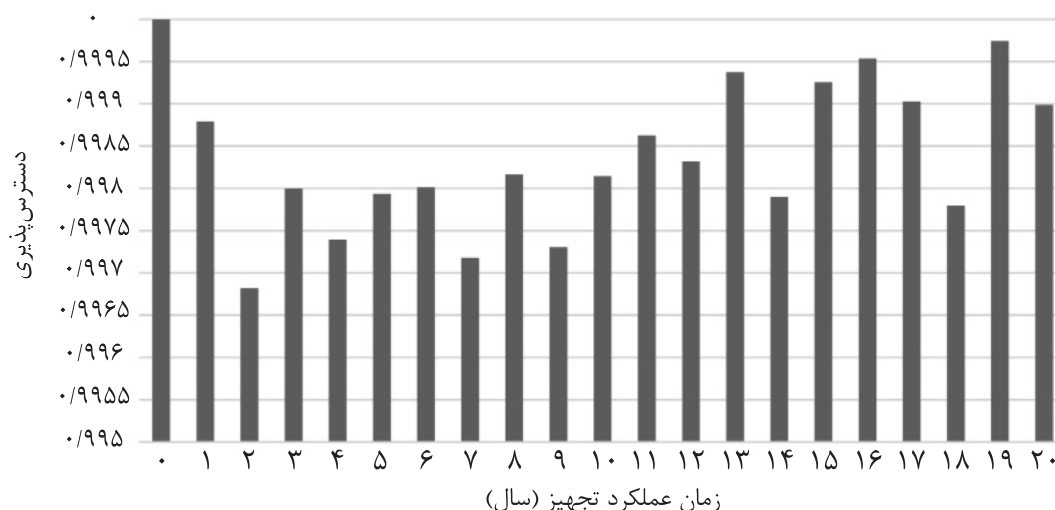
بررسی شاخص‌های دسترس‌پذیری

همان‌گونه که در شکل ۹ نشان داده شده است، یک تجهیز در طول کارکرد خود بارها دچار خرابی و تعمیر شده که این امر بر راندمان کاری تجهیز تأثیر به‌سزایی دارد. شناسایی زمان دقیق تعمیرات پیش‌گیرانه[1]، باعث می‌شود که تجهیز از سرویس خارج نشده و زمان خرابی (TTF) تجهیز افزایش یافته و زمان بین خرابی (TBF) [2] افزایش یابد؛ لذا علاوه‌بر شناسایی زمان مناسب تعمیرات پیش‌گیرانه با کاهش زمان تعمیرات نیز می‌توان زمان خاموشی (DT) [3] تجهیز را کاهش داد.

1. Preventive Maintenance
2. Time Between Failure
3. Down Time



شکل ۱۳ دسترس‌پذیری سالیانه و نرخ تعمیر پمپ روان‌کاری الف) و دسترس‌پذیری سالیانه ب)



شکل ۱۴ دسترس‌پذیری کل سیستم پمپ روان‌کاری

با داشتن اطلاعات کامل از تجهیز، شامل زمان کارکرد در هر دوره قبل از خرابی، زمان خرابی، نوع خرابی و تعداد خرابی، می‌توان به یک برنامه مفید جهت ارزیابی آینده تجهیز دست یافت. قابل ذکر است که در این رساله، نرخ خرابی تجهیز با فرض اجرای تعمیرات پیش‌گیرانه ثابت در نظر گرفته شده است. همان‌گونه که قبلاً گفته شد، نکته قابل توجهی که در شکل ۱۰ نشان داده شده، این است که زمانی‌که تجهیز به‌صورت دوره‌ای کار می‌کند، لحظه آماده‌به‌کار یا Stand- by، جزء زمان کارکرد سیستم محسوب می‌شود و مشمول زمان خاموشی یا خرابی (DT) نمی‌شود. تفکیک زمانی، از لحظه خرابی سیستم تا زمانی که سیستم مجدداً به سرویس می‌آید، نقش مهمی در برنامه‌ریزی تعمیرات تجهیز دارد. کل زمان خرابی، از لحظه خراب شدن تا لحظه روشن شدن و در مدار قرار گرفتن تجهیز را زمان ترمیم (TTRes) [1] می‌گویند که دربرگیرنده زمان تعمیر فعال[2] نیز هست. با توجه به توضیحات داده‌شده، شاخص‌های دسترس‌پذیری در بازه گردآوری داده‌های خرابی و تعمیر یک‌ساله که به‌صورت تجمعی برای سال‌های بعد افزایش می‌یابد، در جدول ۳ ارائه شده است؛ به این صورت که در هر سال، داده‌های سال‌های قبل نیز منظور گردیده است؛ به‌عنوان مثال، در سال دوم، از داده‌های سال اول و دوم استفاده شده است.

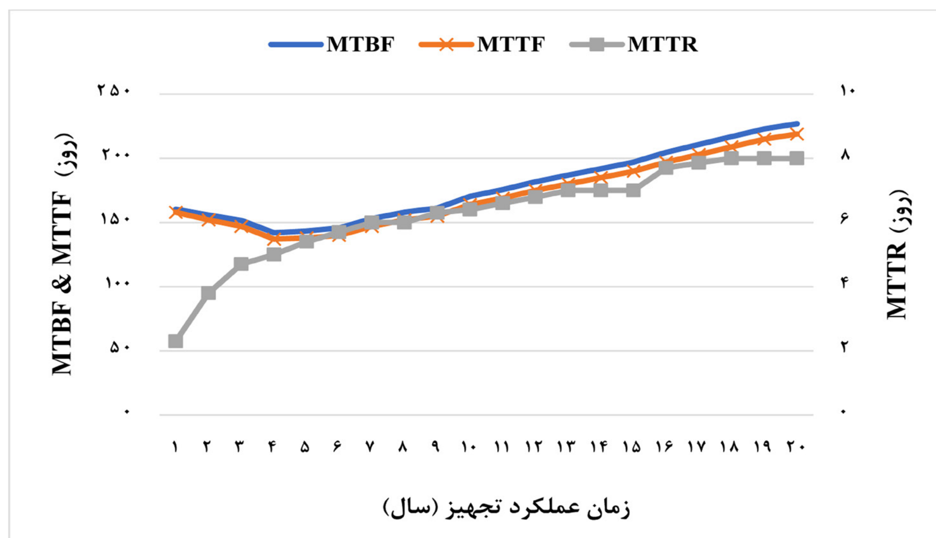
1. Time To Restoration
2. Active Repair Time

جدول ۳ شاخص‌های سالیانه دسترس‌پذیری پمپ در طول دوره کارکرد

MTTF (روز)	MTTF (روز)	MTBF (روز)	دوره جمع‌آوری داده‌ها
۲/۳	۱۵۸	۱۶۰/۳	۱
۳/۸	۱۵۲	۱۵۵/۸	۲
۴/۷	۱۴۷	۱۵۱/۷	۳
۵	۱۳۷	۱۴۲	۴
۵/۴	۱۳۸	۱۴۳/۴	۵
۵/۷	۱۴۰	۱۴۵/۷	۶
۶	۱۴۷	۱۵۳	۷
۶	۱۵۲	۱۵۸	۸
۶/۳	۱۵۵	۱۶۱/۳	۹
۶/۴	۱۶۴	۱۷۰/۴	۱۰
۶/۶	۱۶۹	۱۷۵/۶	۱۱
۶/۷۹	۱۷۵	۱۸۱/۷۹	۱۲
۶/۹۳	۱۸۰	۱۸۷	۱۳
۶/۹۹	۱۸۵	۱۹۲	۱۴
۷	۱۹۰	۱۹۷	۱۵
۷/۷	۱۹۷	۲۰۴/۷	۱۶
۷/۸۶	۲۰۳	۲۱۰/۸۶	۱۷
۷/۹۷	۲۰۹	۲۱۷	۱۸
۸	۲۱۵	۲۲۳	۱۹
۸	۲۱۹	۲۲۷	۲۰

همان‌طور که در جدول ۳ نشان داده شده است، قبل از خرابی تجهیز، برنامه تعمیرات پیش‌گیرانه باید تنظیم شود که در یک بازه زمانی بین روزهای ۱۵۰ تا ۱۶۰، این عمل منجر به افزایش میانگین دوره کارکرد تجهیز (MTTF) می‌شود که در سال‌های انتهایی می‌توان برنامه تعمیرات پیش‌گیرانه را در بازه‌های زمانی ۲۰۰ روزه تنظیم نمود. این عمل، باعث ارتقاء قابلیت اطمینان تجهیز می‌گردد؛ به‌گونه‌ای که پس از تنظیم برنامه زمان‌بندی تعمیرات پیش‌گیرانه، عملاً طول دوره زمانی کارکرد سیستم تا خرابی افزایش یافته و نیازمند تحلیل مجدد جهت برآورد شاخص‌های ارتقا یافته جدید می‌شود. این عمل، همچنین موجب صرفه‌جویی در هزینه‌های تعمیرات پیش‌گیرانه اضافی می‌گردد. شکل ۱۵، نشان می‌دهد با آنکه زمان تعمیر تجهیز با افزایش سن تجهیز بیشتر شده است، اما میانگین دوره کارکرد تجهیز طولانی‌تر شده که منجر به افزایش میانگین دوره‌های بین خرابی (MTTF) می‌شود.

پژوهش نفت شماره ۱۲۶، آذر و دی ۱۴۰۱، صفحه ۵۶-۳۸



شکل ۱۵ شاخص‌های دسترس‌پذیری هر پمپ در طول دوره کارکرد

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، ضمن شناسایی فاکتورهای تأثیرگذار در مدت‌زمان تعمیر، جهت محاسبه مدت‌زمان تعمیر تجهیز در شرایط مختلف خرابی، از منطق فازی استفاده گردید که با توجه به کیفی بودن بسیاری از فاکتورهای تعمیر، امکان استفاده مؤثر از محاسبات ریاضی و عددی جهت برآورد دقیقی از زمان تعمیر وجود نداشت و در این حالت، منطق فازی با استفاده از توابع زبانی و قواعد منطقی امکان دخیل نمودن تجربه پرسنل تعمیرات را در قالب فاکتورهای تعمیر به‌صورت توابع زبانی و گزاره‌های شرطی میسر نمود؛ که از مشخصات برجسته این پژوهش، دخیل نمودن مستقیم تجربه انسانی در محاسبه زمان تعمیر می‌باشد. در ادامه، جهت شبیه‌سازی و همچنین پیش‌بینی رفتار تعمیر تجهیز در آینده، از سیستم شبکه عصبی-فازی تطبیقی (ANFIS) استفاده شده و زمان تعمیر تجهیز برای سال‌های آینده تخمین زده شد. در نهایت با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو، دسترس‌پذیری تجهیز و شاخص‌های دسترس‌پذیری محاسبه گردید که علاوه‌بر محاسبه نرخ تعمیر تجهیز، مدت‌زمان کارکرد تجهیز بدون نیاز به تعمیرات پیش‌گیرانه نیز با استفاده از شاخص‌های مربوطه به‌دست آمد. موضوع مهم در این مقاله، میزان دسترس‌پذیری سالیانه تجهیز است که در سال‌های سوم، ششم، هشتم و هجدهم، این میزان کاهش یافته و یا دارای نوسان شدید نسبت به سال‌های قبل و بعد خود می‌باشد؛ که این مورد توسط ANFIS و مونت کارلو پیش‌بینی شده است. این موضوع، جهت برنامه‌ریزی تعمیرات اپراتورها و افزایش زمان کارکرد سیستم، حیاتی است.

مراجع

[1] Shi H, Deng J (2011) Modeling and simulation of combined diesel and gas turbine propulsion system mission reliability, in International Conference on Transportation, Mechanical, and Electrical Engineering, 1189–1192.
[2] OREDA (2015) Offshore and onshore Reliability Data. (4th edition), OREDA Participant, 835.
[3] Tavner P J (2007) Review of condition monitoring of rotating electrical machines, IET Electric Power Applications.
[4] Borgonovo E, Marseguerra M, Zio E (2000) A Monte Carlo methodological approach to plant availability modeling with maintenance,aging and obsolescence, Reliability Engineering and System Safety, 67, 1: 61-73.

[5]. Momen M, Behbahaninia A (2021) Realistic availability assessment of energy system behavior patterns by monte carlo method, Arabian Journal for Science and Engineering, 46, 12: 11885-11895.
[6]. Tang S, Wang F (2005) Reliability analysis for a repairable parallel system with time-varying failure rates, Applied Mathematics-A Journal of Chinese Universities, 20, 1: 85-90.
[7]. Afefy I H (2010) Reliability-centered maintenance methodology and application: A case study, Engineering, 2, 11: 863–873.
[8]. sabouhi H, fotuhi- firuzabad M, dehghanian P (2016) Identifying critical component of combined cycle power plant for implementation of reliability-centered maintenance, Csee Journal of Power and Energy Systems, 2: 2.
[9]. Dehghanian P, Fotuhi Firuzabad M, Bagheri-Shouraki S, Razi Kazemi A A(2012) Critical component identification in reliability centered asset management of power distribution systems via fuzzy AHP, IEEE Systems Journal, 6: 4.
[10]. Celebi E (2019) A Fuzzy decision support system for managing maintenance activities of critical component in manufacturing systems, Juornal of Manufacturing Systems, 110-120.
[11]. Gallab M, Bouloiz H, Lamrani Alaoui Y, Tkiouat M (2018) Risk assessment of maintenance activities using fuzzy logic, Second International Conference on Intelligent Computing in Data Sciences, Procedia Computer Science, 148: 226-235.
[12]. Ramazani S, memarani A (2011) A fuzzy rule-based system for fault diagnosis, using oil analysis result, International Journal of Industrial Engineering Production Research, 22: 91-98.
[13]. Mazurkiewicz D (2015) Maintenance of belt conveyors using an expert system based on fuzzy logic, Archives of Civil and Mechanical Engineering, 15, 2: 412-418.
[14]. Grassi A, Gamberini R, Mora C, Rimini B (2009) A fuzzy multi-attribute model for risk evaluation in workplaces, Safety Science, 47: 707–716.
[15]. Chandima Ratnayake R M, Antosz K (2017) Development of a risk matrix and extending the risk-based maintenance analysis with fuzzy logic, Procedia Engineering, 182: 602 – 610.
[16]. Shang K, Hossen Z (2013) Applying fuzzy logic to risk assessment and decision-making, Canadian institute of Actuaries, Society of Actuaries, 1-59.
[17]. Jang J S R (1991) Fuzzy modeling using generalized neural networks and kalaman filter algorithm, AAAI, 91: 762-767.
[18]. Wang W Q, Golnaraghi M F, Ismail F (2004) Prognosis of machine health condition using neuro-fuzzy systems, Mechanical Systems and Signal Processing, 18, 4: 813-831.
[19]. Jang J S, Sun C T (1995) Neuro-fuzzy modeling and control. Proceedings of the IEEE, 83, 3: 378-406.
[20]. Pérez Pérez E J, López Estrada F R, Puig,V, Valencia-Palomo G, Santos Ruiz I (2022) Fault diagnosis in wind turbines based on ANFIS and takagi–sugeno interval observers, Expert Systems with Applications, 117698.
[21]. Karaboga D, Kaya E (2019) Adaptive network based fuzzy inference system (ANFIS) training approaches: a comprehensive survey, Artificial Intelligence Review, 52, 2263-2293.
[22]. Smith D J (2011) Reliability, maintainability and Risk, Practical Methods for Engineers. 9th ed, Science Direct.
[23]. Dernancourt F (2013) Introduction to fuzzy logic. Massachusetts Institute of Technology, 21, 50-56.
[24]. Porebski S (2022) Evaluation of fuzzy membership functions for linguistic rule-based classifier focused on explainability, interpretability and reliability, Expert Systems with Applications, 199: 117116.
[25]. Dernancourt F (2011) Introduction to Fuzzy Logic, First edition, University of Dortmund, Germany, Springer, 14.
[26]. Karpovsky M G (1977) Harmonic analysis over finite commutative groups in linearization problems for systems of logical functions. Information and Control, 33, 2: 142-165.
[27]. Lotfi Zadeh A (1975) The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning, Information Science, 199-249.
[28]. Lotfi Zadeh A (1978) Fuzzy sets as a basis for theory of possibility, International Journal Fuzzy Sets and Systems, 100, 1: 3-28.
[29]. Jang J S R, Sun C T, Mizutani E (2005) Neuro- fuzzy and soft computing-a computational approach to learning and machine intelligence, [Book Review], IEEE Trans Automat Contr, 42.
[30]. Guy Jackson L (1998) IEEE recommended practice for the design of reliable industrial and commercial power systems, 1st edittion, Institute of Electrical and Electronics Engineering, 1-501.
[31]. Report on reliability survey of industrial plants, Part I: Reliability of Electrical Equipment, IEEE Trans Ind Appl 1974; IA-10:213–35.
[32]. Albrecht P F, Appiarius J C, McCoy R M, Owen E L, Sharma D K (1986) Assessment of the reliability of motors in utility applications-updated, IEEE Transactions on Energy Conversion, 1: 39-46.
[33]. Report of large motor reliability survey of industrial and commercial installations (1985) Part I. IEEE

Transactions on Industry Applications, IA-21, 4: 865-872.
[34]. De Gooijer J G, Hyndman R J (2006) 25 years of time series forecasting, International journal of forecasting, 22, 3: 443-473.
[35]. Sherwin D, Hoyland A, Rausand M (1995) System reliability theory-models and statistical methods, Journal of the Royal Statistical Society: Series D (The Statistician), 44, 4: 543-544.
[36]. Smith J U M, Billington R, Allan RN (1994) Reliability evaluation of engineering systems, Journal of the Royal Statistical Society: Series D (The Statistician), 43, 4: 599-600.
[37]. Lewis E E. Introduction to Reliability Engineering. Wiley; 1987.
[38]. Billinton R, Allan R. N (1992) Reliability evaluation of engineering systems: concepts and techniques, 2nd edition, New York: Plenum, Springer, 1-453.

شناسایی شکستگی‌های در سازندهای کنگان و دالان با استفاده از ترکیب نگار تصویری FMI و نشان‌گرهای لرزه‌ای حساس به شکستگی ها

احسان گل‌محمدی[1]، علی مرادزاده[1]، ابوالفضل عبدالهی پور[1]، رضا محبیان[1*] و شروین بهرامعلی اسدی[2]

۱- دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، ایران

۲- گروه پتروفیزیک، شرکت خدمات مهندسی نفت کیش، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۱۹

چکیده

مطالعه و ارزیابی مخازن شکسته از بزرگ‌ترین چالش‌های مطالعاتی میادین نفتی محسوب می‌شود. از این رو ارائه روشی کارآمد در شناخت و تعیین میزان شکستگی‌ها ضروری است. نگارهای تصویری FMI از ابزارهای بسیار قوی برای مطالعه و شناسایی شکستگی‌ها در اطراف دیواره چاه‌ها هستند. نگار تصویری FMI یک تصویر غیرمستقیم با تفکیک‌پذیری بالا از دیواره چاه نمایش می‌دهد. هدف از این پژوهش استفاده از نگارهای تصویری FMI و نشان‌گرهای لرزه‌ای بهینه جهت ارزیابی توزیع شکستگی‌های میدان مورد مطالعه است. جهت نیل به هدف از داده لرزه‌ای سه‌بعدی پس از برانبارش و داده نگار تصویری FMI در سه چاه A، B و C موجود در یکی از میادین جنوبی ایران استفاده شد که دو چاه A و B جهت تخمین و شناسایی و چاه C نیز جهت اعتبار سنجی نتایج مورد استفاده قرار گرفت. جهت شناسایی شکستگی‌ها در چاه‌های میدان و تفسیر نگارهای FMI، از نرم‌افزار ژئولاگ استفاده گردید. در نهایت شکستگی‌ها در چاه A با مجموع ۱۵۲ شکستگی‌های باز و بسته با روند شمال شرقی- جنوب غربی و در چاه B با مجموع ۲۳۵ شکستگی‌های باز و بسته با روند کلی شمال- جنوب شناسایی شد و زون‌های دارای چگالی شکستگی بالا نیز مشخص شد. سپس این نتایج به نرم‌افزار همپسون راسل انتقال پیدا کرد و با استفاده از ترکیب نشان‌گرهای لرزه‌ای بهینه چگالی شکستگی در میدان مورد مطالعه تخمین زده شد. همچنین با استفاده از میزان توزیع شکستگی‌ها، گسل‌های میدان نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از روش تلفیق نگارهای تصویری FMI و نشان‌گرهای لرزه‌ای مناسب، روشی کارآمد در مطالعه و ارزیابی توزیع شکستگی‌ها در مخازن شکسته است که می‌تواند در میادین مشابه نیز مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی: مخازن شکاف‌دار، شکستگی‌ها، گسل‌ها، نگار تصویری FMI، چگالی شکستگی، نشان‌گرهای لرزه‌ای

*مسؤول مکاتبات

آدرس الکترونیکی mohebian@ut.ac.ir

شناسه دیجیتال: (DOI:10.22078/PR.2022.4806.3154)

پژوهش نفت شماره ۱۲۶، آذر و دی ۱۴۰۱، صفحه ۷۱-۵۷

مقدمه

در امر توسعه و مدیریت تولید مخازن نفت، اطلاع وآگاهی از جزئیات و ناهمگنی‌های مخزن از حساسیت و اهمیت بالایی در توصیف مخزن برخوردار است. یکی از پارامترهای مخزن که مطالعه و توصیف آن نقش مهمی در کنترل بهتر چاه‌ها و مدیریت مخازن ایفا می‌کند، ناپیوستگی‌ها می‌باشد. با مطالعه ناپیوستگی‌های مخزن شامل گسل‌ها و شکستگی‌های بزرگ و کوچک مقیاس، می‌توان مدل دقیقی از رفتار مخزن ارائه نمود. بیش از ۶۵٪ سیالات هیدروکربوری خاورمیانه در مخازن کربناته قرار دارند [۱]. مخازن کربناته از نظر پارامترهای پتروفیزیکی نسبت به مخازن ماسه‌سنگی، دارای سازوکار پیچیده‌ای هستند به‌طوری‌که مخازن کربناته دارای تخلخل پایین‌تری نسبت به مخازن ماسه‌سنگی هستند. در نتیجه، وجود شکستگی‌ها در مخازن کربناته در افزایش تخلخل و تراوایی سنگ مخزن اهمیت ویژه‌ای دارد [۲]. مطالعه شکستگی‌ها در میادین نفتی به طرح توسعه میدان، تعیین محل حفاری چاه‌های جدید، شناسایی محل‌های مستعد هرزروی گل و در نهایت، کاهش هزینه‌های اکتشاف نفت کمک زیادی می‌کند [۳]. روش‌های مختلفی جهت شناسایی زون‌های شکسته در مخازن هیدروکربوری وجود دارد. استفاده از نگارهای پتروفیزیکی، مغزه‌ها، آزمایش چاه، هرزروی گل و مقاطع لرزه‌ای روش‌هایی هستند که برای شناسایی شکستگی‌ها استفاده می‌شوند [۴]. هر کدام از این روش‌ها دارای محدودیت‌هایی نیز هستند، به‌طور مثال مقاطع لرزه‌ای تنها توانایی تفکیک شکستگی‌ها و گسل‌ها در مقیاس بزرگ را دارند [۵]. داده‌های مغزه نیز با اینکه از روش‌های معمول برای شناسایی شکستگی‌ها است اما با توجه به هزینه بالای تهیه و جهت‌دار نبودن آن‌ها امکان استفاده از آن‌ها را با محدودیت مواجه می‌کند، لذا نگارهای تصویری نسبت به آن‌ها ابزار مناسب‌تری جهت مطالعه شکستگی‌ها هستند [۶]. نگارهای تصویری تصاویری با قابلیت تفکیک‌پذیری بالا از دیواره چاه برای هر دو چاه بدون لوله جداری و دارای لوله جداری، ارائه می‌دهد. پیچیدگی مخازن جدید اکتشافی و همچنین سرعت عملیات بالا نسبت به عملیات مغزه‌گیری، اهمیت و کاربرد نگارهای تصویری را بیشتر می‌کند [۷]. از طرفی، استفاده از نگارهای تصویری نیز دارای محدودیت‌هایی می باشد که از آن جمله می‌توان به تعداد کم این نگارهای برداشت شده در میدان و همچنین نبود اطلاعات این نگارها در فواصل بین چاه‌ها اشاره کرد. هدف از مطالعه حاضر، ارائه روشی نوین جهت مطالعه و شناسایی شکستگی‌ها با استفاده از تلفیق داده‌های نگار تصویری و داده‌های لرزه نگاری است. با استفاده از روش تعریف شده می‌توان توزیع چگالی شکستگی حاصل از نگارهای تصویری را به‌کمک نشان‌گر های لرزه‌ای بهینه به کل میدان تعمیم داد و تصویر کلی از توزیع شکستگی‌ها در کل میدان به‌دست آورد.

معرفی منطقه و زمین‌شناسی میدان مورد مطالعه

میدان مورد مطالعه بخشی از زاگرس است که در حوضه خلیج‌فارس و در حاشیه شرقی ایران قرار دارد. زاگرس چین‌خورده در اثر حرکت رو به شمال صفحه عربی و برخورد آن با صفحه ایران، در راستای شمال‌شرقی- جنوب‌غربی فشرده می‌شود. به همین دلیل، در حال حاضر زاگرس تحت دگرشکلی، ناشی از فشارهای زمین ساختی با روند شمال‌شرقی- جنوب‌غربی، فرجام هم‌گرایی و برخورد قاره‌ای، قرار دارد [۷]. میدان مورد نظر در فراساحل ایران، قسمتی از کمان قطر- گاوبندی است که در قسمت شرقی صفحه عربی تشکیل شده است (شکل ۱) [۸]. ساختمان اولیه و اصلی پی سنگ، بیشترین اثر را در میان عوامل زمین ساختی مؤثر در شکل و موقعیت منطقه خاورمیانه، در پیدایش ساختمان این میدان با روند شمالی- جنوبی داشته‌اند.



شکل ۱ موقعیت تقریبی میدان مورد مطالعه [۱۱]

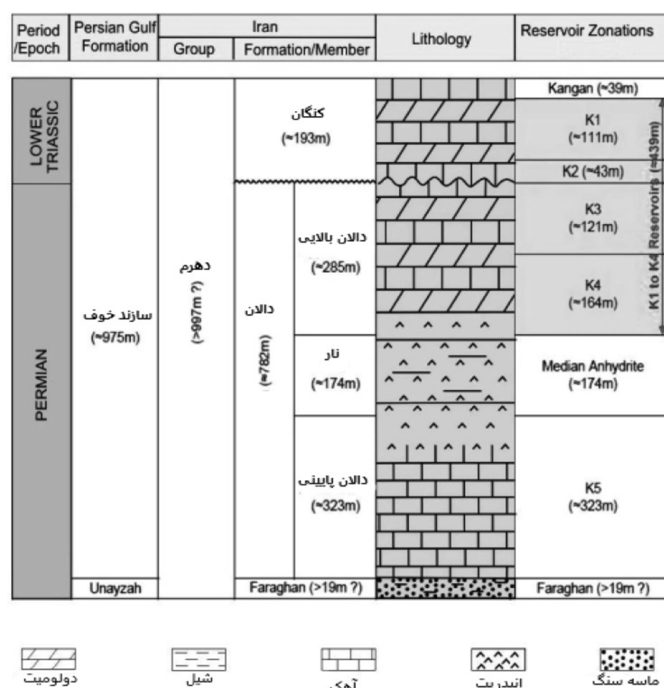
سایر عوامل زمین ساختی مؤثر مانند حرکات کوهزایی میوسن میانی (کوهزایی زاگرس) ضعیف تر عمل نموده‌اند [۹]. حضور نهشته‌های سکانس‌های عظیم کربناته کم عمق برروی سنگ‌های پالئوزوئیک در حاشیه شرقی صفحه عربی و حضور گستره وسیعی از سنگ‌های منشأ غنی در حوضه عربستان با سن سیلورین، زمینه‌ساز اصلی حضور مخازن هیدروکربوری در منطقه محسوب می‌شود. سازند کنگان با سن تریاس پیشین و سازند دالان با سن پرمین میانی- بالایی مخزن اصلی ذخایر گازی خلیج فارس را تشکیل می‌دهند. جنس سازند کنگان و دالان بالایی سنگ آهک و دولومیتی است که همراه با میان لایه‌های شیلی و انیدریتی می‌باشد. بخش تشکیل‌دهنده سنگ مخزن واحدهای آهکی و دولومیتی می‌باشد. سازندهای کنگان و دالان به‌عنوان دو واحد از گروه دهرم، یک مخزن هیدروکربنی مشترک را تشکیل می‌دهند و تنها براساس ویژگی‌های مخزنی و سکانس استراتیگرافی به چهار واحد مخزنی K1، K2، K3 و K4 تفکیک می‌شوند (شکل ۲). گروه دهرم از نظر انباشت گاز افقی بسیار مهمی است و بیشتر ذخایر گاز زاگرس در این گروه قرار دارد [۱۰].

داده‌های مورد استفاده

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش شامل داده‌های نگار پتروفیزیکی و داده لرزه‌ای سه‌بعدی سه چاه A، B و C می‌باشد که دو چاه A و B جهت تخمین و شناسایی و چاه C نیز جهت اعتبارسنجی نتایج مورد استفاده قرار گرفت. چاه A و B که مورد تفسیر قرار گرفت شامل نگارهای متداول پتروفیزیکی (نگار گاما، صوتی، نوترون، چگالی، کالیپر)، نگار تصویری FMI و داده لرزه‌ای سه‌بعدی پس از برانبارش (داده‌های چاه A در عمق ۲۶۶۹ – ۳۱۳۲ m و چاه B در عمق ۲۶۶۲-۳۱۰۲ m) می‌باشد. از داده‌های پتروفیزیکی برای بخش اول پژوهش جهت شناسایی شکستگی‌ها و استخراج نگار چگالی شکستگی و از داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی نیز برای بخش دوم پژوهش که نگار چگالی شکستگی را به‌کمک نشان‌گرهای لرزه ای مناسب برروی حجم داده لرزه‌ای سه‌بعدی تخمین زده شد مورد استفاده قرار گرفت. محدوده مقطع در راستای محور x و مقطع در راستای محور y لرزه‌ای، ۹۰۰-۲۴۰ (اینلاین) و ۱۰۳۸۰-۶۳۶۰(کراس‌لاین) می‌باشد.

روش مطالعه

در ابتدا داده‌های موجود چاه‌ها وارد نرم‌افزار ژئولاگ شد. قبل از وارد شدن به چرخه محاسبات پتروفیزیکی مواردی چون کنترل کیفی داده‌ها، تصحیحات محیطی و هم عمق‌سازی داده‌ها باید انجام گردد. پس از کنترل کیفی و ویرایش داده‌ها، محاسبات مقدماتی برروی داده‌ها انجام شد. پارامترهای مختلفی مانند چگالی، شوری و مقاومت گل حفاری، دما و فشار مخزن، قطر چاه و ضخامت سله گل و ریزش دیوار چاه یا پر شدن منافذ آن برروی نگارهای مختلف تأثیرگذار هستند که اثر آن‌ها برای تصحیحات و ارزیابی در نظر گرفته شد. پس از آن، تصحیحات محیطی انجام شد. تمام عوامل موجود در اطراف سوند موجود در چاه که برروی پاسخ ابزار تأثیر داشته باشند مورد بررسی قرار گرفت.



شکل ۲ طبقه‌بندی ارائه شده برای واحدهای سنگی پرمین- تریاس [۱۲]

برخی از این عوامل مانند دما و فشار ناشی از شرایط طبیعی درون سازند بوده و سایر عوامل نیز از گل حفاری موجود در چاه حاصل می‌شوند. پس از انجام مراحل قبل با رسم و خواندن حداقل دو ابزار در مقابل هم ترکیب سنگ‌شناسی مشخص شد. در این مطالعه به منظور تعیین ترکیب سنگ‌شناسی از نمودار متقاطع نوترون/چگالی استفاده شده است. باتوجه به نمودار نوترون/چگالی و همچنین اطلاعات قبلی میدان، توالی مخزن مورد مطالعه از انیدریت، آهک و دولومیت با مقداری رس تشکیل شده است. پس از انجام مراحل قبل، ارزیابی پتروفیزیکی به دو روش قطعی و احتمال انجام شد. جهت شناسایی و بررسی شکستگی‌ها، ابتدا داده‌های نگارهای تصویری در نرم‌افزار ژئولاگ مورد پردازش قرار گرفتند. این پردازش‌ها شامل تصحیح عمق، تصحیح سرعت، ساخت تصویر، بهبود تصویر، تطابق بالشتک‌های تصویر و برابرسازی و نرمال‌سازی داده‌ها می‌باشد.
پس از پردازش نگارهای تصویری، عوارض شناسایی شده توسط ابزار تصویرگر FMI [۱] نظیر لایه‌بندی، گسل، شکستگی‌های طبیعی و القایی مشخص شدند و شیب و امتداد هر یک از آن‌ها تعیین شد. نتیجه بررسی و مطالعه عوارض تمام طول دو چاه در جدول ۱ قابل مشاهده است.

جدول ۱ تعداد شکستگی‌های باز، بسته، القایی و گسل‌ها در دو چاه A و B

چاه	چاه A	چاه B
تعداد شکستگی‌های باز	۹۴	۱۷۵
تعداد شکستگی‌های بسته	۵۸	۶۰
تعداد شکستگی‌های القایی	۲	۱
تعداد گسل	۱	-
مجموع	۱۵۵	۲۳۶

پس از بررسی و تفسیر نگار تصویری FMI، نگار چگالی شکستگی برای چاه‌ها استخراج شد. منظور از چگالی شکستگی، چگالی برحسب تعداد شکستگی در متر است. سپس داده‌های مورد نیاز به‌همراه نگار چگالی شکستگی در نرم‌افزار همپسون راسل وارد شدند.

1. Fullbore Formation Micro Imager

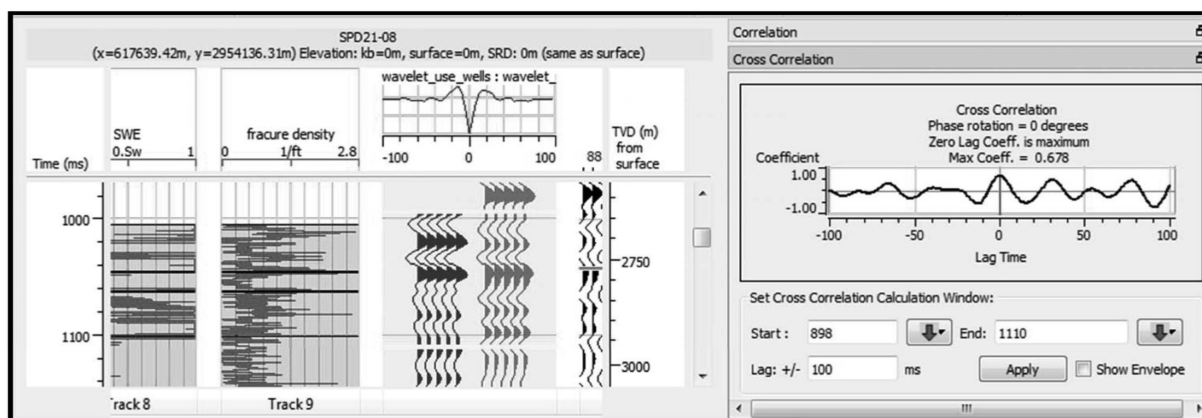
در مرحلـه اول، وارون‌سـازی لـرزه‌ای پـس از برانبـارش انجـام شـد. در ایـن فرآینـد ابتـدا عملیـات پیـک کـردن افق‌هـا بـرای درون‌یابـی بیـن چاه‌هـا جهـت سـاخت مـدل اولیـه انجـام گرفـت. پـس از آن، فرآینـد تطابـق داده‌هـای چـاه بـا داده‌هـای لـرزه‌ای و سـپس اسـتخراج موجـک انجـام شـد. همان‌طـور کـه در شـکل ۳ مشـاهده می‌شـود، رد لرزه‌هـای آبـی رنـگ همـان رد لرزه‌هـای مصنوعـی سـاخته شـده توسـط نـگار سـونیک، چگالـی و موجـک از پیـش تعریـف شـده بـرای نرم‌افـزار اسـت. پـس از انجـام ایـن کار موجـک اسـتخراجی نمایـش داده می‌شـود (شـکل ۴). بعـد از انجـام مراحـل فـوق نوبـت بـه سـاخت مـدل اولیـه بـرای وارون‌سـازی لـرزه‌ای رسـید. بـرای سـاخت مـدل اولیـه ابتـدا چاه‌هـای موردنیـاز و نگارهـای موجـود درآن بـرای سـاخت مـدل اولیـه و افق‌هـای پیـک شـده را انتخـاب و در انتهـا یـک فیلتـر زمانـی برروی مـدل درون‌یابـی شـده اعمـال شـد و نرم‌افـزار فرکانس‌هـای بـالای مـدل را فیلتـر کـرد. در شـکل ۵ مـدل وارون‌سـازی شـده قابـل مشـاهده اسـت.

پیش‌بینی نگار چگالی شکستگی

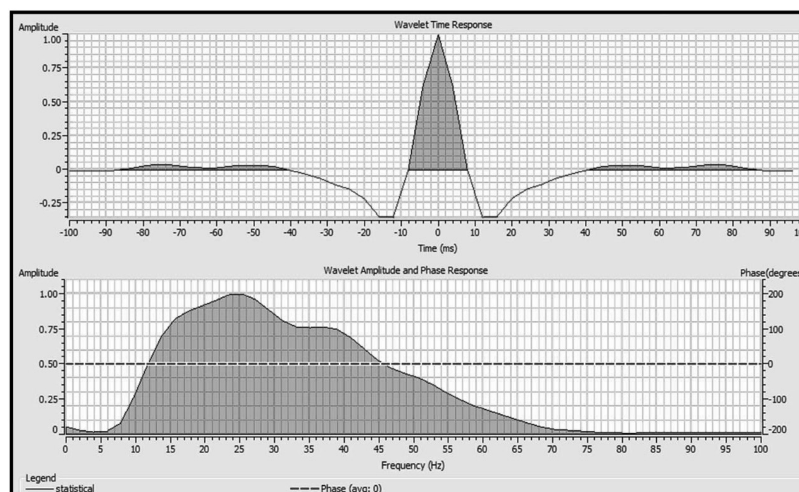
هـدف از ایـن قسـمت پیش‌بینـی نـگار چگالـی شکسـتگی بـرای کل داده لـرزه‌ای سـه‌بعدی از طریـق نشـان‌گرهای لـرزه‌ای و وارون‌سـازی اسـت. جهـت انجـام ایـن کار از فرآینـد ادغـام اسـتفاده شـد. به‌طـور کلـی، مراحلـی کـه در ایـن قسـمت انجـام گرفـت عبارتنـد از:

۱) ارزیابـی داده‌هـای نـگار و لـرزه‌ای در موقعیـت چـاه جهـت تشـخیص نشـان‌گرهای مناسـب.

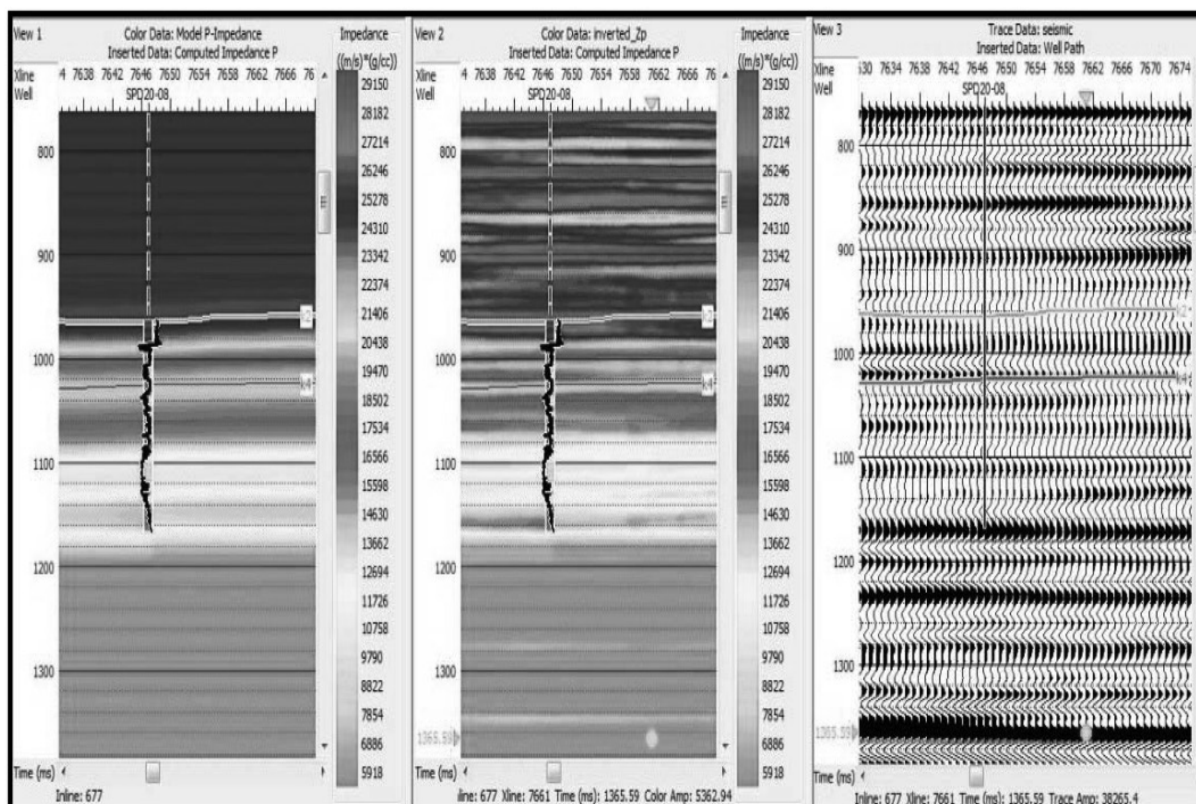
۲) اسـتخراج یـک رابطـه بـا اسـتفاده از بـرازش چنـد خطـی.



شکل ۳ ساخت رد لرزه پس از استخراج موجک و مشاهده میزان تطابق چاه B



شکل ۴ نمایش موجک جدید استخراج شده در حیطه فرکانس



شکل ۵ مدل وارون‌سازی شده در موقعیت چاه A

۳) اعمال رابطه استخراج شده برروی یک حجم از داده لرزه‌ای سه‌بعدی، جهت ایجاد یک حجم از

ویژگی‌های نگار چگالی شکستگی[1]

با توجه به داده‌های موجود از مقطع وارون‌سازی به‌عنوان نشان‌گر استفاده می‌شود. نشان‌گر ها به دو دسته درونی و خارجی تقسیم می‌شوند. نشان‌گرهای درونی دسته‌ای هستند که درون فرآیند ادغام محاسبه می‌شوند درحالی‌که نشان‌گرهای خارجی در خارج از این برنامه محاسبه و برای فراخوانی در برنامه موردنظر مانند یک فایل لرزه‌ای بارگذاری می‌شوند و محدودیتی در تعداد آن‌ها وجود ندارد.برای قدرت عملیات بیشتر و نتایج مطمئن‌تر، از چند نشان‌گر به‌طور همزمان برای پیش‌بینی استفاده شده است. پس از انتخاب چاه‌ها و گروه نشان‌گرها، یک فهرستی با ارزیابی کلیه نشان‌گرهای قابل دسترس با استفاده از برازش گام به گام، تولید شد. طریقه کار در این روش به این صورت است که در ابتدا، تک تک نشان‌گر ها را مورد بررسی قرار می‌گیرد تا بهترین نشان‌گر را پیش‌بینی کند. معیار ارزیابی برای پیش‌بینی، اندازه‌گیری میزان خطای جذر میانگین مربعات می‌باشد. به این معنا که نشان‌گر انتخابی باید کمترین میزان خطا را داشته باشد. بعد از یافتن تک نشان‌گرها، به سراغ بهترین جفت نشان‌گر می‌رود. در واقع باقی نشان‌گرها را با نشان‌گر انتخابی از طریق آزمون سعی و خطا مورد ارزیابی قرار می‌دهد. پس از یافتن بهترین جفت نشان‌گر، تا زمانی‌که به عدد مورد نظر (عددی که قبل از اجرای این روش در بیشترین تعداد نشان‌گر ثبت کردیم) برسد این روش ادامه پیدا می‌کند. پس از انجام مراحل قبل همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، ردیف اول، مربوط به بهترین تک نشان‌گر، ردیف دوم مربوط به نشان‌گری است که با ردیف اول بهترین جفت نشان‌گر را می‌سازد.

1. Seismic Multi Attributes

	Target	Final Attribute	Training Error	Validation Error
1	Fracture density	Instantaneous Frequency(Principal_components_analysis_1)	0.283563	0.300055
2	Fracture density	Integrate(Volume_curvature_times)	0.250522	0.304151
3	Fracture density	(single_trace_seismic_attributes)**2	0.224611	0.283840
4	Fracture density	Filter 55/60-65/70(SpatialStatistics_edge_enhancement_dDz)	0.209095	0.289023
5	Fracture density	Quadrature Trace(Variance_seismic)	0.194960	0.298404
6	Fracture density	Amplitude Weighted Phase(SpatialStatistics_edge_enhancement_dDz)	0.182898	0.272744
7	Fracture density	Amplitude Weighted Cosine Phase(InstantaneousCurvature_pDip)	0.170821	0.352532
8	Fracture density	Instantaneous Frequency(SpatialStatistics_edge_enhancement_TT)	0.158722	0.420210
9	Fracture density	Log(Principal_components_analysis_1)	0.148051	0.574941
10	Fracture density	1 / (SpatialStatistics_edge_enhancement_TT)	0.137636	0.752160

شکل ۶ فهرست چند نشان‌گر انتخاب شده

همان‌طور که انتظار می‌رود با افزایش نشان‌گرها، میزان خطا کاهش می‌یابد. نمودار میزان خطای متوسط نسبت به تعداد نشان‌گرها در شکل ۷ قابل مشاهده است. از طریق این نمودار می‌توان دریافت که چه تعداد نشان‌گر می‌بایست استفاده شود. در واقع، می‌توان گفت که آخرین نقطه در این نمودار، میزان خطایی را نشان می‌دهد که می‌توان برای پیش‌بینی جدید با استفاده از تعداد نشان‌گرهایی که انتخاب کردیم، انتظار داشت. نمودار جاری نشان می‌دهد که نباید بیشتر از شش نشان‌گر استفاده شود چرا که استفاده بیشتر باعث افزایش خطای اعتبارسنجی شده و هیچ بهبودی در روند کار نشان نخواهد داد. برای مشاهده نمودار متقاطع یکی از اوپراتورهای چند نشان‌گر، شش نشان‌گر انتخاب شد که نمودار آن در شکل ۸ مشاهده می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود میزان همبستگی بین چگالی شکستگی به‌دست آمده از نشان‌گرهای لرزه‌ای بهینه و چگالی شکستگی واقعی در دو چاه A و B حدود ۹۳٪ می‌باشد. جهت بررسی و اعتبارسنجی نتایج به‌دست آمده،از چاه شاهد (چاه C) استفاده شد. میزان همبستگی بین چگالی شکستگی به‌دست آمده از روشی که عنوان شد و چگالی شکستگی که در چاه تخمین زده شد می‌توان صحت و اعتبار نتایج حاصل را بررسی کرد.

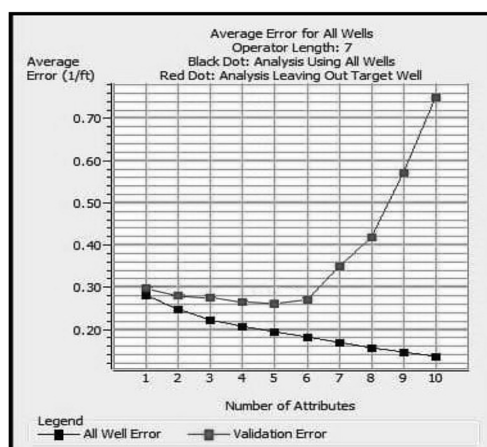
شکل ۹ نشان می‌دهد میزان همبستگی چگالی شکستگی در چاه C حدود ۸۹٪ می‌باشد که این میزان همبستگی بالا نشان از عملکرد موثر و کارآمد روش به‌کار برده شده در این پژوهش می‌باشد.

اعمال چگالی شکستگی بر داده لرزه‌ای سه‌بعدی

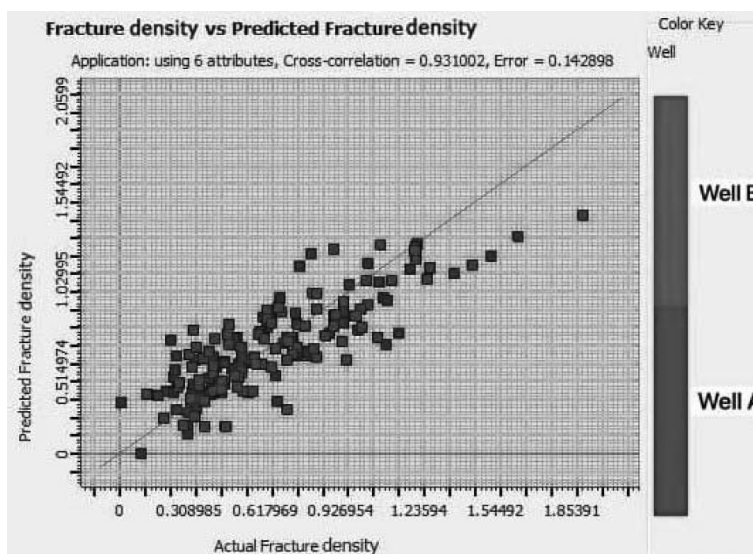
پس از استخراج روابط چند نشان‌گر بین داده لرزه‌ای و نگار هدف (چگالی شکستگی)، می‌توان نتیجه را برروی کل داده لرزه‌ای سه‌بعدی اعمال کرد. شکل ۱۰ نتیجه اعمال چگالی شکستگی برروی داده لرزه‌ای را در مقطع در راستای محور x ۴۷۴ نشان می‌دهد.

بحث و نتایج

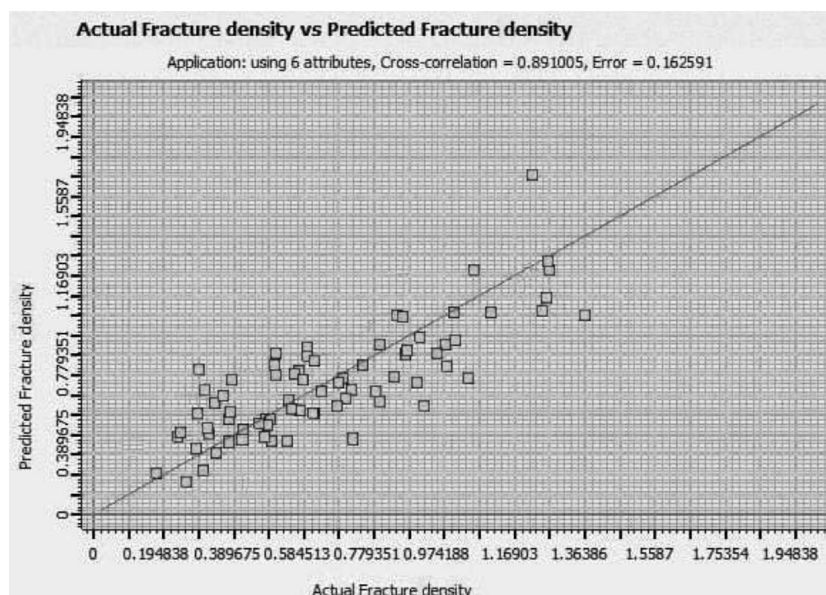
صرف‌نظر از عملکرد عوامل دیاژنزی در پیدایش مجموعه‌ای از شکستگی‌های طبیعی با جهت‌یابی‌های پراکنده، نبود سطوح گسلی و چین‌خوردگی، مطالعه و تفسیر شکستگی‌های طبیعی را در طبقات رسوبی مسطح دشوار می‌کند. میدان گازی مورد مطالعه نیز یک نمونه از این موارد می‌باشد که تغییرات ناچیز شیب لایه‌بندی و انحنای ساختمانی از یک طرف و نبود سطوح گسلی و گنبدهای نمکی از طرف دیگر، تحلیل هندسی سنگ‌های مشاهده شده را برروی نمودارهای تصویری FMI سخت کرده است.



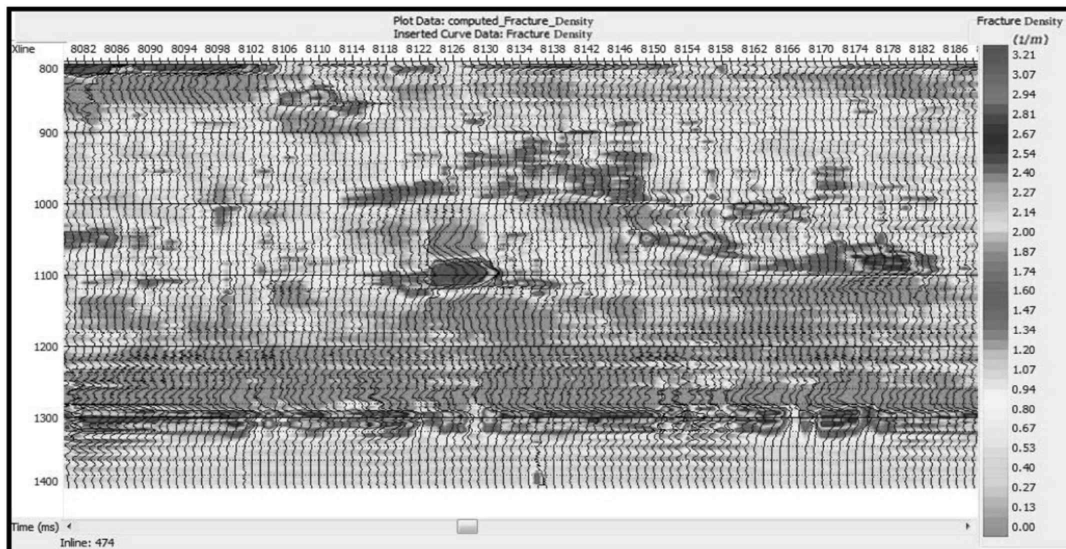
شکل ۷ نمودار میزان خطای متوسط نسبت به تعداد نشان‌گرها



شکل ۸ نمودار متقاطع نگار واقعی و نگار پیش‌بینی شده دو چاه A و B



شکل ۹ نمودار متقاطع نگار واقعی و نگار پیش‌بینی شده چاه C



شکل ۱۰ اعمال چگالی شکستگی بر داده لرزه‌ای مربوط به مقطع در راستای محور x شماره ۴۷۴

با توجه به اهمیت گسل‌های پی‌سنگی با روند شمال- شمال‌شرقی در شکل‌گیری ساختمان میدان مورد مطالعه عملکرد سه عامل منطقه‌ای در پیدایش شکستگی‌ها را می‌توان به‌صورت زیر عنوان کرد:

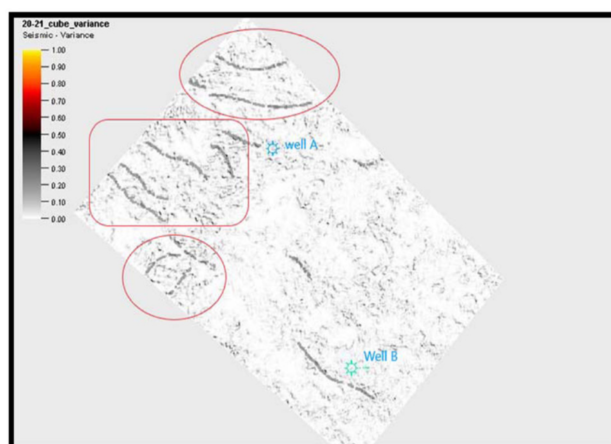
۱- حضور گسل‌های پی‌سنگی و فعالیت حاصل از آن‌ها

۲- اختلاف فشارش ناشی از تغییرات ضخامت در طول حوضه یکی از پارامترهای ایجادکننده شکستگی در پی‌سنگ است.

۳- بارگذاری‌های حاصل از چین‌خوردگی و ایجاد انحنای منطقه‌ای در قسمت پیش بوم حوضه که عامل تراستی شدن طبقات و شکستگی آن‌ها در طول حوضه می‌شود.

با توجه به موارد عنوان شده، شکستگی‌هایی که دارای روند شمال و جنوبی هستند عمود بر روند گسل‌های پی‌سنگی با مؤلفه راستالغز، حاصل فعالیت مجدد این ساختارهای تکتونیکی می‌باشد. شکستگی‌های دارای روند شمال شرقی- جنوب غربی وابسته به جهت اعمال فشار به دو صفحه عربستان و ایران مرکزی در شروع و در حین هم‌گرایی آن‌ها به‌سوی یکدیگر می‌باشد. شکستگی‌های دارای روند شمال غربی– جنوب شرقی مربوط به کشش حاشیه خارجی پوسته در طول رشد چین است که می‌توان آن را نتیجه انحنای ناحیه‌ای ناشی از انحنای پوسته همراه با ایجاد حوضه پیش بوم در حاشیه شمال شرقی صفحه عربی در نظر گرفت که به موازات خط فرورانش صفحه عربی به زیر ایران مرکزی در کل منطقه تشکیل شده‌اند.جهت بررسی شکستگی‌ها و گسل‌های میدان مورد مطالعه، می‌توان از برش زمانی چگالی شکستگی و نشان‌گرهای لرزه‌ای به‌خصوص شناسایی شکستگی‌ها و گسل‌ها استفاده کرد. یکی از دلایل تمرکز شکستگی‌ها میتواند به‌دلیل وجود گسل‌های عظیم در میدان باشد. با توجه به‌روش انجام شده در این تحقیق می‌توان تا حدودی شکستگی‌ها و گسل‌های میدان را تخمین زد. ابتدا از نشان‌گر واریانس استفاده شد. این نشان‌گر یک مقدار برمبنای روش لبه‌یابی است که شباهت بین شکل موج‌ها با ردلرزه‌های لرزه‌ای مجاور را در راستای یک پنجره افقی یا عمودی محاسبه می‌کند که نشان می‌دهد نشان‌گر واریانس یک ابزار بسیار قوی در شناسایی لبه گسل‌ها وکانال‌ها است. همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، نشان‌گر واریانس اعمال شده و مناطقی که به یک شکستگی عظیم نزدیک هستند مشخص شده است. نشان‌گر بعدی که استفاده شد نشان‌گر آشفتگی است.

پژوهش نفت شماره ۱۲۶، آذر و دی ۱۴۰۱، صفحه ۷۱-۵۷



شکل ۱۱ برش زمانی لرزه‌ای پس از اعمال نشان‌گر واریانس در زمان ۱۰۳۰ ms

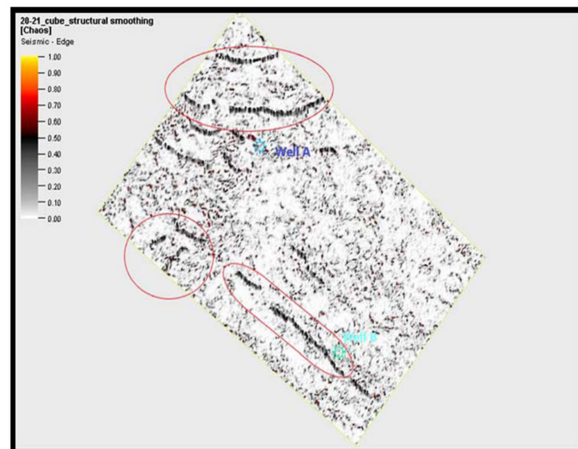
حضور گسل‌ها و شکستگی‌ها را می‌توان توسط نشان‌گر آشفتگی تشخیص داد. نشان‌گر آشفتگی با به‌دست آوردن گرادیان و محاسبه بیشترین مقدار بردار ویژه درماتریس کوواریانس جهت غالب را نشان می‌دهد. هر چقدر اختلاف بین بیشترین مقدار بردار ویژه بادیگر مقادیر ویژه بیشتر باشد پیوستگی در داده‌های لرزه‌ای بیشتر و هر چقدر میزان این اختلاف کمتر یا برابر باشند، نشان‌دهنده وجود شکستگی در داده‌های لرزه‌ای است.

در شکل۱۲ که نشان‌گر آشفتگی اعمال شده است حداکثرآشفتگی در قسمت شمالی میدان به‌دست آمده این مسئله نشان‌دهنده حضور بیشتر شکستگی‌ها و یا گسل‌ها در این محدوده است. پس از بررسی نشان‌گر های واریانس و آشفتگی، نشان‌گر لرزه‌ای انحنا اعمال شد تا فرایند تشخیص گسل‌های منطقه آسان‌تر انجام شود. نشان‌گر انحنا در حالت سه‌بعدی صفحات قائم نسبت به یک سطح بیان می‌شود به‌طوری‌که تداخل دو صفحات قائم درسطح، انحنای حداقل و حداکثر را نشان خواهد داد. اگر افق به شکل تاقدیس یا ناودیس باشد بردارهای نرمال به ترتیب به‌صورت واگرا و همگرا قرار می‌گیرند به‌طوری‌که مقدار انحنا در طاقدیش مثبت و درناودیس منفی در نظر گرفته می‌شود. شکل ۱۳ نشان‌گر انحنای اعمال شده برروی مقطع زمانی ۱۰۳۰ ms نشان می‌دهد.

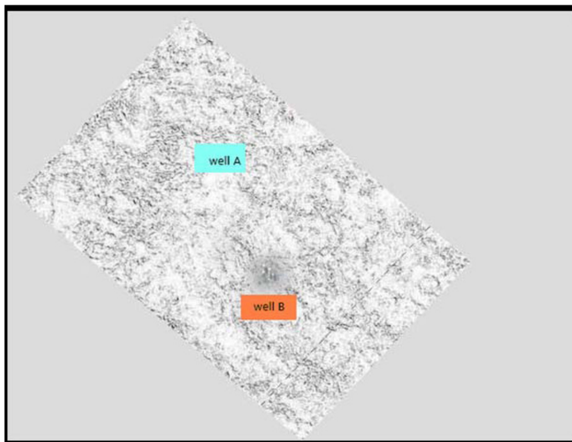
مشاهده می‌شود الگوی گسلی که در برش زمانی لرزه‌ای قبلی مشاهده گردید برروی این نشان‌گر بهتر شناسایی می‌شود.پس از شناسایی الگوهای گسلی در میدان مورد مطالعه، در برش زمانی ۱۰۳۰ ms چگالی شکستگی تخمین زده شده در همین برش زمانی ساخته شد تا الگوی چگالی شکستگی را در نواحی که احتمال حضور گسل وجود دارد را بررسی کنیم.

جهت بررسی بیشتر از نشان‌گر لرزه‌ای همدوسی[۱] شکل ۱۴ و نشان‌گر تجزیه طیفی[۲] شکل ۱۵ نیز استفاده شد. نشان‌گر لرزه‌ای همدوسی، تشابه بین ردلرزه‌ها را اندازه گیری می‌کند. این نشان‌گر تصویری نشان می‌دهد که مشخصات زمین‌شناسی مانند گسل‌ها و کانال‌ها را آشکار سازد. مقدار همدوسی بین صفر و یک می‌باشد به‌طوری‌که هر چقدر میزان همدوسی به یک نزدیک‌تر باشد، میزان پیوستگی بیشتر و هرچه به صفر نزدیک‌تر باشد پیوستگی کمتر می‌شود. در نتیجه هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد، احتمال حضور گسل و شکستگی بیشتر است در شکل مشخص است در مناطقی که احتمال شکستگی‌ها و گسل وجود دارد میزان پیوستگی کمتر است. شکل ۱۶ برش زمانی لرزه‌ای چگالی شکستگی را در زمان ۱۰۳۰ ms نشان می‌دهد.

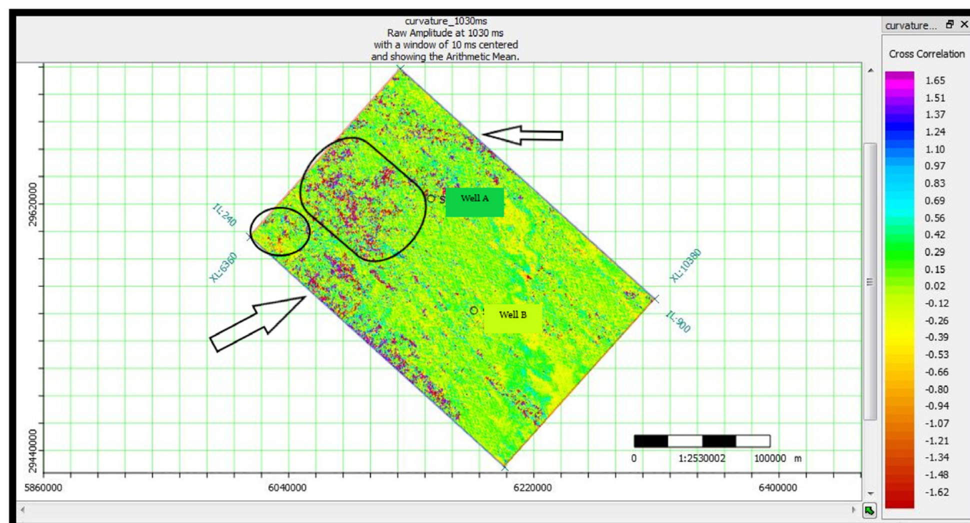
1. Coherency
2. Spectral Decomposition



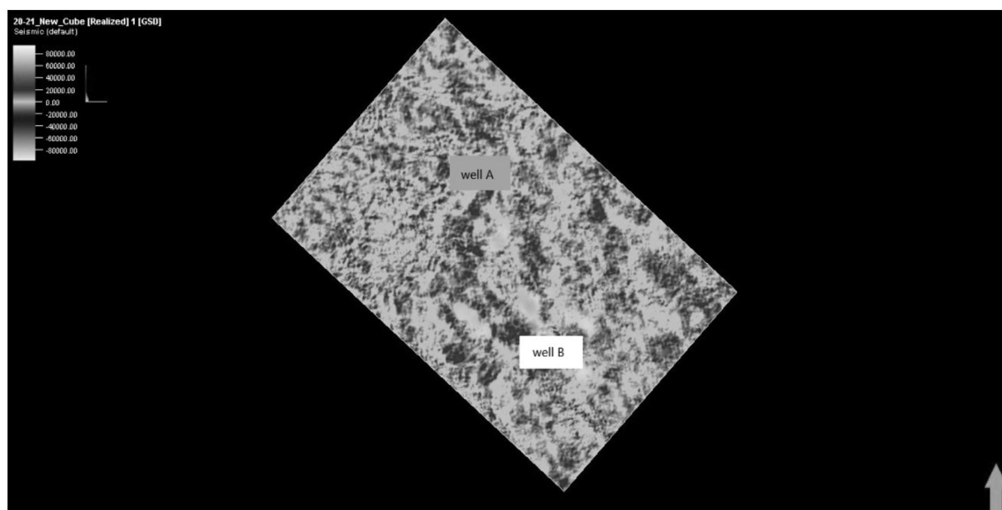
شکل ۱۲ برش زمانی لرزه‌ای پس از اعمال نشان‌گر آشفتگی در زمان ms ۱۰۳۰



شکل ۱۴ برش زمانی لرزه‌ای پس از اعمال نشان‌گر همدوسی در زمان ms ۱۰۳۰

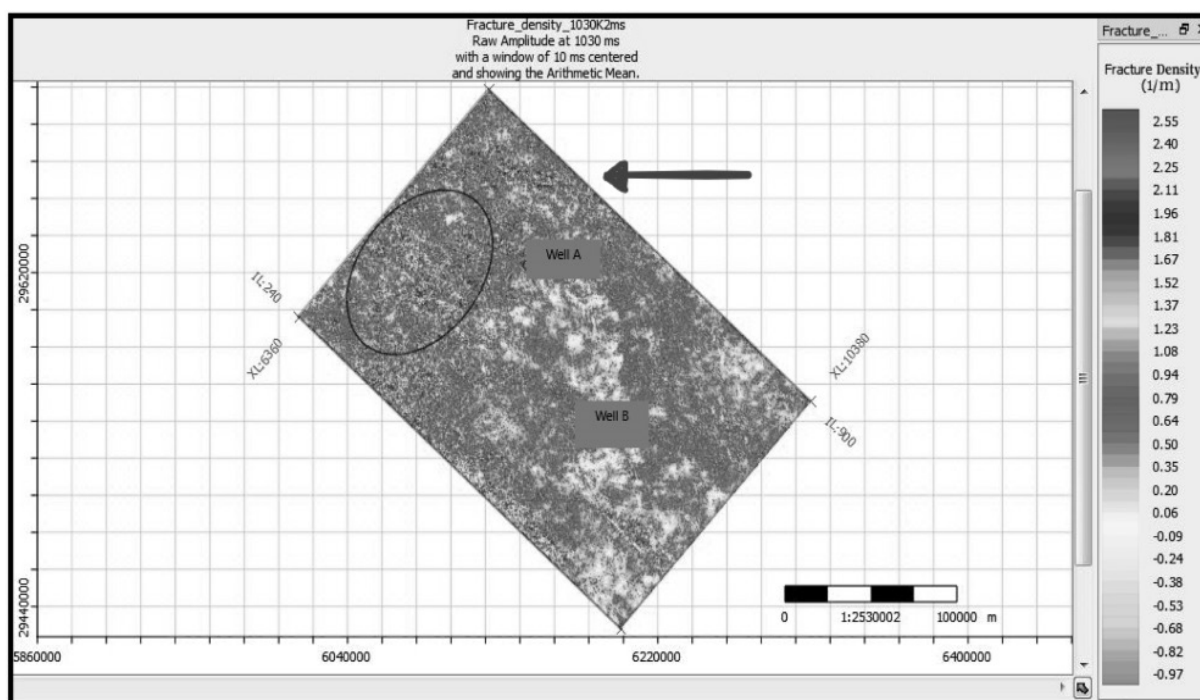


شکل ۱۳ برش زمانی لرزه‌ای پس از اعمال نشان‌گر انحنا در زمان ms ۱۰۳۰



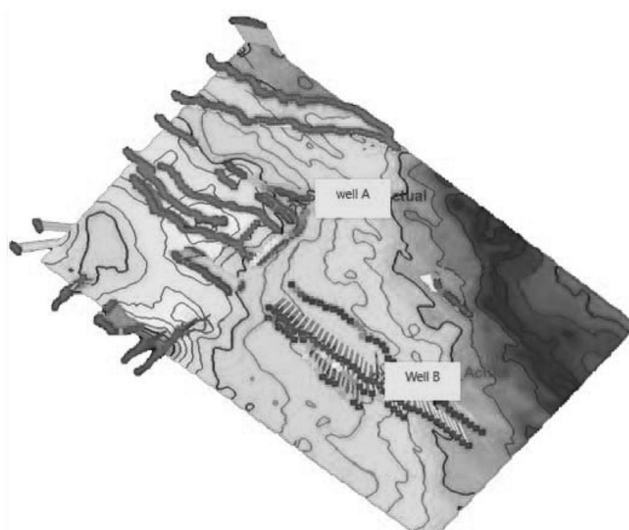
شکل ۱۵ برش زمانی لرزه‌ای پس از اعمال نشان‌گر تجزیه طیفی در زمان ms ۱۰۳۰

پژوهش نفت شماره ۱۲۶، آذر و دی ۱۴۰۱، صفحه ۷۱-۵۷

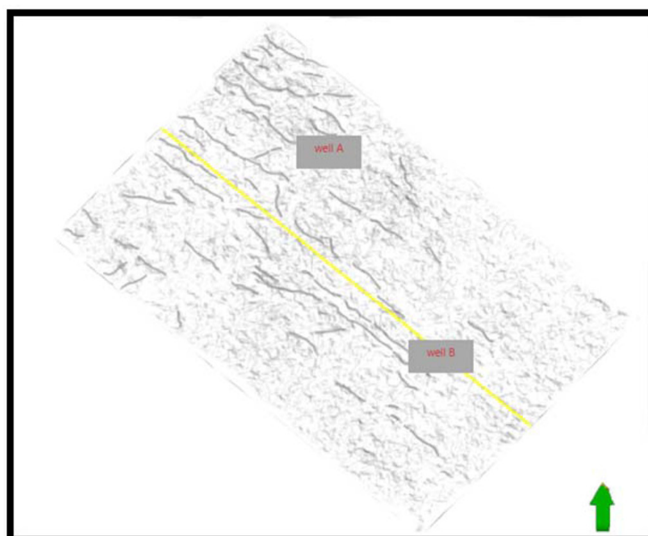


شکل ۱۶ برش زمانی لرزه‌ای چگالی شکستگی در زمان ۱۰۳۰ ms

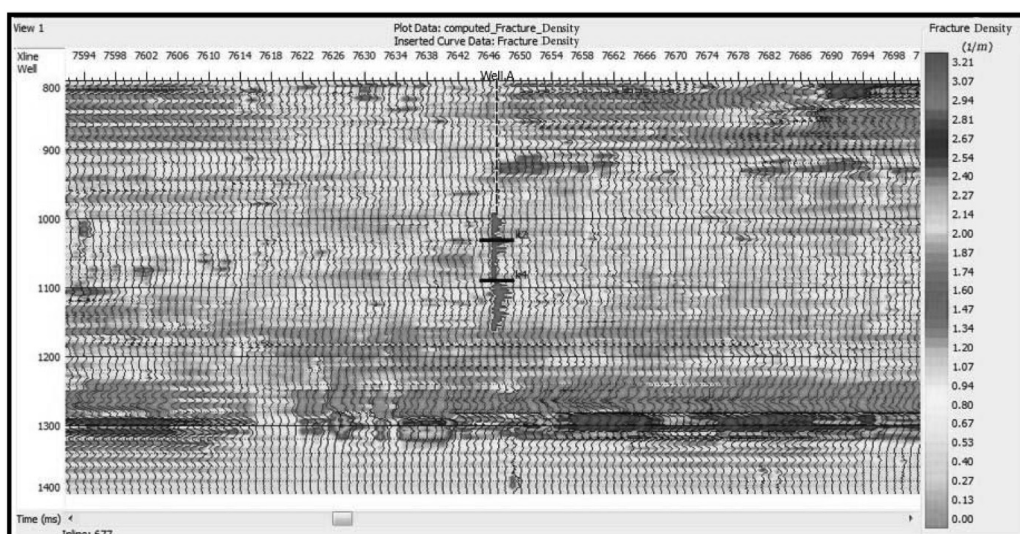
مشاهده می‌شود مناطقی که احتمال حضور گسل تخمین زده شد دارای چگالی شکستگی بالایی هستند و تا حدودی صحیح به‌نظر می‌رسند. پس از بررسی توسط نشان‌گرها و توزیع چگالی شکستگی گسل‌های میدان تخمین زده شد که در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود. جهت مقایسه با نتایج گرفته شده در این مطالعه از نشان‌گر ردیابی مورچه که یک روش شناسایی مبتنی بر تفسیر تک نشان‌گری است استفاده شد. نشان‌گر ردیابی مورچه براساس الگوی رفتاری مورچه‌ها در پیدا کردن مسیر بهینه دست‌یابی به هدف به‌کمک کلونی مورچه‌ها ایجاد شده است. نشان‌گر ردیابی مورچه یک گردش کار دارد به این صورت که ابتدا فرآیند هموارسازی و سپس نشان‌گر واریانس بر داده لرزه‌ای اعمال می‌شود و پس از آن نشان‌گر ردیابی مورچه اعمال می‌شود. شکل ۱۸ برش زمانی لرزه‌ای نشان‌گر ردیابی مورچه را در زمان ۱۰۳۰ ms نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود نتایجی که این نشان‌گر در تشخیص شکستگی‌ها و گسل‌ها ارائه می‌دهد همسو با نتایج گرفته شده از نشان‌گرهای قبلی و همچنین برش زمانی چگالی شکستگی می‌باشد. بررسی چگالی شکستگی در برش‌های زمانی مختلف نشان می‌دهد که تراکم شکستگی در اطراف چاه A نسبت به چاه B بیشتر بوده که می‌توان شرایط برای برداشت از مخزن را مناسب‌تر کند. همچنین با توجه به ارزیابی پتروفیزیکی انجام گرفته زون‌های K2 و K4 از زون‌های تولیدی مخزن می‌باشد. این موضوع با توجه به توزیع چگالی شکستگی بالا در مقطع در راستای محور x و مقطع در راستای محور y، لاین‌های دو چاه تاییدی بر مناسب بودن زون‌های K2 و K4 می‌باشد (شکل ۱۹). علاوه‌براین نتایج شکستگی‌های به‌دست آمده می‌تواند راهنمای بسیار خوبی در شناسایی مناطق مستعد هرزروی گل حفاری باشد. هرزروی گل حفاری خصوصیات فیزیکی و مکانیکی بخش‌های مختلف یک میدان گازی را نمایان می‌سازد. هرزروی گل در اعماق مختلف از گزارش‌های روزانه زمین‌شناسی و حفاری چاه‌های میدان استخراج می‌شود و به‌صورت یک نمودار در کنار مجموعه اطلاعات دیگر قرار می‌گیرد.



شکل ۱۷ تفسیر گسل‌های میدان مورد مطالعه

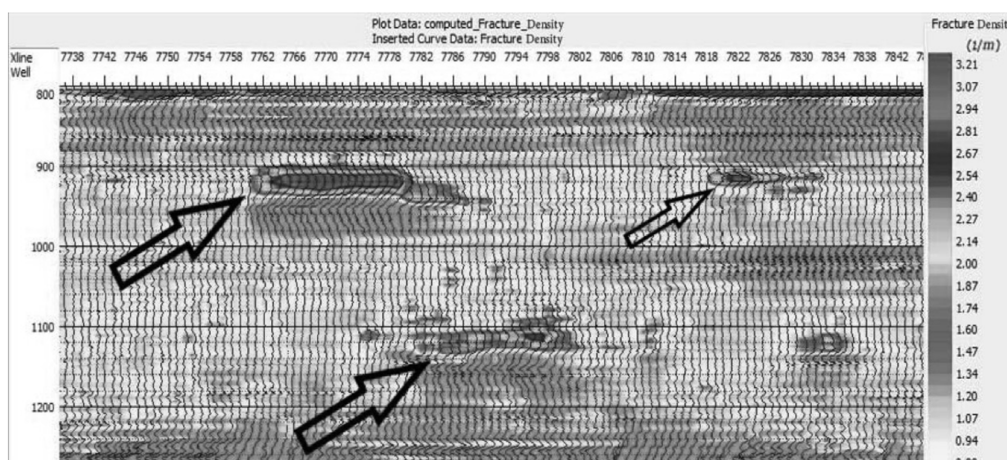


شکل ۱۸ برش زمانی لرزه‌ای نشان‌گر ردیابی مورچه در زمان ۱۰۳۰ ms



شکل ۱۹ مقطع لرزه‌ای توزیع چگالی شکستگی در محل چاه A- مقطع در راستای محور x ۶۷۷

با استفاده از توزیع چگالی شکستگی در تمام میدان می‌توان تا حدودی مناطقی که مستعد هرزروی گل هستند را شناسایی کرد که با این کار می‌توان در حفر چاه‌های جدید نیز ریسک را کاهش داد و با انتخاب هوشمند، جهت مناسب مسیر حفاری را انتخاب کرد. در صورت داشتن مقادیر تنش‌های اصلی سازند با استفاده از اصول و روابط مکانیک سنگی، می‌توان تنش‌های اطراف چاه را نیز محاسبه کرد. با توجه به اطلاعات به‌دست آمده، هرزروی گل در حین حفاری سازند کنگان در اغلب چاه‌های میدان دارای بیشترین مقدار نسبت به هرزروی گل در سازند دالان فوقانی می‌باشد. در این مطالعه نیز با توجه به‌میزان توزیع چگالی شکستگی در میدان مورد نظر و تشخیص شکستگی‌های شدید حاصل از گسل‌های احتمالی مناطقی به‌عنوان مناطق مستعد هرزروی گل شناسایی شد که تاییدی بر نتایج عملیاتی است. شکل ۲۰ یک مقطع لرزه‌ای را نشان می‌هد. در این مقطع نواحی تحت عنوان مناطق مستعد هرزروی گل شناسایی شده‌اند. این مناطق دارای چگالی شکستگی بسیار بالایی می‌باشند.



شکل ۲۰ شناسایی مناطق مستعد هرزروی گل در مقطع در راستای محور x ۶۷۷

نتیجه‌گیری

می‌توان نتایج حاصل از این پژوهش را به‌طور خلاصه عنوان نمود که:

با توجه به مباحث عنوان شده ارزیابی توزیع چگالی شکستگی در کل میدان، روشی کارآمد و مؤثر در مطالعه شکستگی‌ها و گسل‌ها می‌باشد. استفاده از این روش دقت را در شناسایی شکستگی‌ها و گسل‌ها افزایش می‌دهد. می‌توان نتیجه گرفت که نشان‌گر لرزه‌ای انحنا و ردیابی مورچه به‌همراه چگالی شکستگی عملکرد بهتری را در تعیین شکستگی‌ها و گسل‌های موجود در میدان مورد مطالعه نشان دادند. بررسی‌ها نشان داد شکستگی‌ها و گسل‌های میدان در منطقه شمالی میدان متمرکز شده‌اند و گسل‌های امتداد لغز شمال غربی-جنوب شرقی ویژگی‌های ساختاری اصلی میدان را تشکیل می‌دهند. علاوه‌براین می‌توان به‌کمک توزیع چگالی شکستگی در محل چاه‌ها، زون‌های تولیدی مخزن را نیز مشخص کنیم. از دیگر نتایج این مطالعه می‌توان گفت به‌کمک تخمین توزیع چگالی شکستگی در کل میدان می‌توان مناطق مستعد هرزروی گل را تا حدودی شناسایی و به عملیات حفر چاه‌های جدید و انتخاب مسیر مناسب حفاری کمک زیادی نمود.

مراجع

[۱]. رضایی م ر (۱۳۸۷) زمین‌شناسی نفت، انتشارات علوی، چاپ سوم. تهران، ۴۷۲
[2]. Horn M K (2003) Giant fields, Giant oil and gas fields of the decade 1990-1999: AAPG Memoir 78, ouston, TX, USA, 340.
[3]. Laubach S E (2003) Practical approaches to identifying sealed and open fractures, AAPG Bulletin, 87, 4: 561-579.
[4]. Thompson L B (2000) Fractured reservoirs: integration is the key to optimization, Journal of Petroleum Technology, 52, 2: 52–54.
[۵]. تخم‌چی ب (۱۳۸۸) شناسایی و طبقه‌بندی درزه‌ها به‌روش ترکیب اطلاعات با نگرشی ویژه به سازند آسماری، پایان‌نامه دکتری، رشته مهندسی معدن گرایش اکتشاف، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده فنی، دانشگاه تهران.
[6]. Martinez L P, Hughs G R, Wiggins M L (2002) Identifcation and characterization of naturally fractured reservoirs using conventional well logs, The University of Oklahoma, 23.
[۷]. آقانباتی س ع (۱۳۸۳) زمین‌شناسی ایران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
[8]. Al-Husseini M I (2000) Origin of the Arabian Plate Structures; Amar Collision and najd Rift, GeoArabia, V.5, N.4, 527-541.
[9]. Konert G, Affifi A M, Al-Hajiri S A, Droste H J (2001) Paleozoic stratigraphy and hydrocarbon habitat of the arabian plate, Geoarabia, 6, 3: 407-442.
[10]. Tavakoli V, Jamalian A (2018) Microporosity evolution in Iranian reservoirs, dalan and dariyan formations, The Central Persian gulf Journal of Natural Gas Science and Engineering, 52: 155-165.
[11]. Tavakoli V, Rahimpour-Bonab H, Esrafili-Dizaji B (2011) Diagenetic controlled reservoir quality of South Pars gas field, an integrated approach, Comptes Rendus Geoscience, 343, 1: 55-71.
[۱۲]. خان محمدی م، شرکتی ش، (۱۳۸۹). تحلیل شکستگی‌ها در میدان گازی پارس جنوبی. ماه‌نامه اکتشاف و تولید، شماره ۷۷، ۴۹ -۴۳.

پژوهش نفت شماره ۱۲۶، آذر و دی ۱۴۰۱، صفحه ۸۲-۷۷

بررسی نرخ‌های رسوب‌گذاری و فرونشست در دشت‌گرگان با استفاده از مدل‌سازی حوضه

ارسلان زینل‌زاده*، جواد هنرمند، سمیه پرهام و کتایون رضایی پرتو

پژوهشکده علوم زمین، پردیس توسعه صنایع بالادستی، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۲۲

چکیده

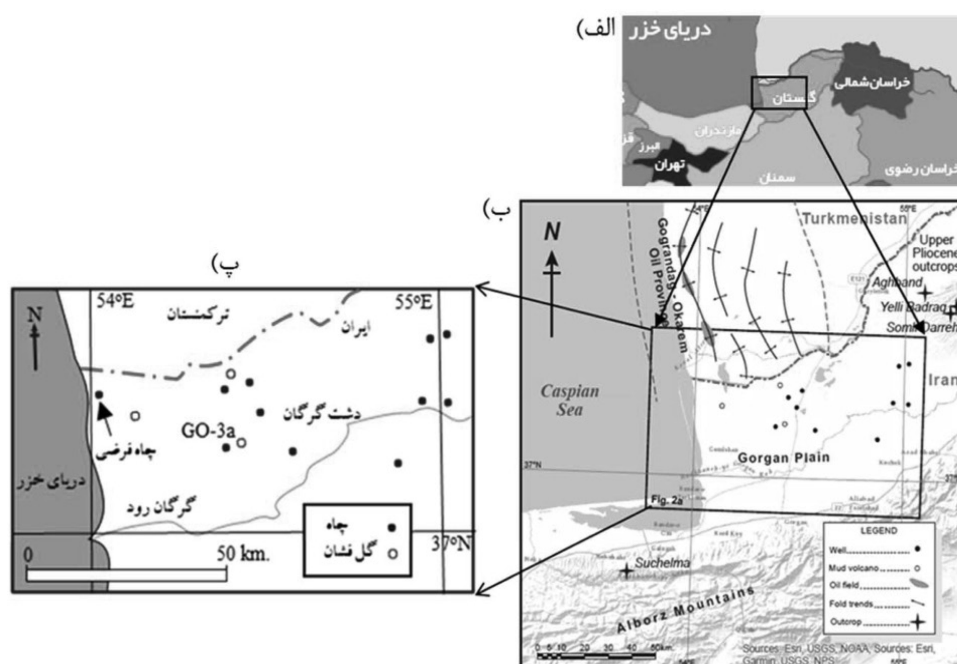
دشت‌گرگان در شمال ایران واقع شده و دارای گل‌فشان و افق‌های پرفشار است. از رسوبات میوسن و قدیمی‌تر این منطقه اطلاعات محدودی وجود دارد و داده‌های موجود از رسوبات پلیوسن و جوان‌تر، شناخت کاملی از زمین‌شناسی این ناحیه ارائه نمی‌دهد. عدم وجود فسیل‌های شاخص در رسوبات، تعیین سن و بررسی گسترش لایه‌ها را با ابهاماتی همراه کرده است. در این مطالعه نرخ‌های رسوب‌گذاری و فرونشست لایه‌های سنوزوئیک در دو چاه، با استفاده از نرم‌افزارهای مدل‌سازی حوضه مورد بررسی قرار گرفته است. رسوبات سنوزوئیک دشت‌گرگان شامل رسوبات پالئوسن-میوسن و سازندهای چلکن (پلیوسن پایینی)، آقچاگیل (پلیوسن بالایی)، آپشرون (پلیستوسن پایینی)، باکو (پلیستوسن بالایی) و نئوکاسپین (هلوسن) است که عمدتاً از ماسه‌سنگ و گل‌سنگ تشکیل شده‌اند. این مطالعه نشان می‌دهد، رسوبات ضخیم پلیوسن-عهد حاضر دشت‌گرگان با نرخ‌های بالا نهشته شده‌اند که هم‌زمان با افزایش فعالیت کوه‌زایی در منطقه و جدایش تدریجی حوضه‌خزرجنوبی از آب‌های آزاد و تغییر محیط رسوبی از دریایی به رودخانه‌ای-دلتایی است. نرخ‌های رسوب‌گذاری نهشته‌های سنوزوئیک به‌سمت بخش ساحلی دشت‌گرگان افزایش می‌یابند. کمترین نرخ‌های رسوب‌گذاری در نهشته‌های پالئوسن-ائوسن و بیشترین نرخ در سازند باکو (پلیستوسن بالایی) است. نرخ‌های رسوب‌گذاری بالا از عوامل شکل‌گیری گل‌فشان و افق‌های پرفشار در منطقه است و این نرخ‌ها می‌توانند تأثیر مهمی در عناصر و فرآیندهای سیستم‌نفتی ناحیه داشته باشند.

کلمات کلیدی: مدل‌سازی‌حوضه، نرخ رسوب‌گذاری، نرخ فرونشست، رسوبات سنوزوئیک، دشت‌گرگان

مقدمه

دشت‌گرگان در جنوب شرق دریاچه خزر واقع‌شده است. این منطقه از جنوب به کوه‌های البرز و از شمال به مرز ایران و ترکمنستان محدود می‌شود (شکل ۱). در ۶۰ سال گذشته فعالیت‌های اکتشاف نفت در این منطقه منجر به حفر ۱۰ چاه شده است. در این چاه‌ها رسوبات زمان حال تا پالئوسن و در دو چاه تا ژوراسیک حفاری شده است.

*مسؤول مکاتبات
آدرس الکترونیکی Zeinalzadeha@ripi.ir
شناسه دیجیتال: (DOI:10.22078/PR.2022.4804.3156)

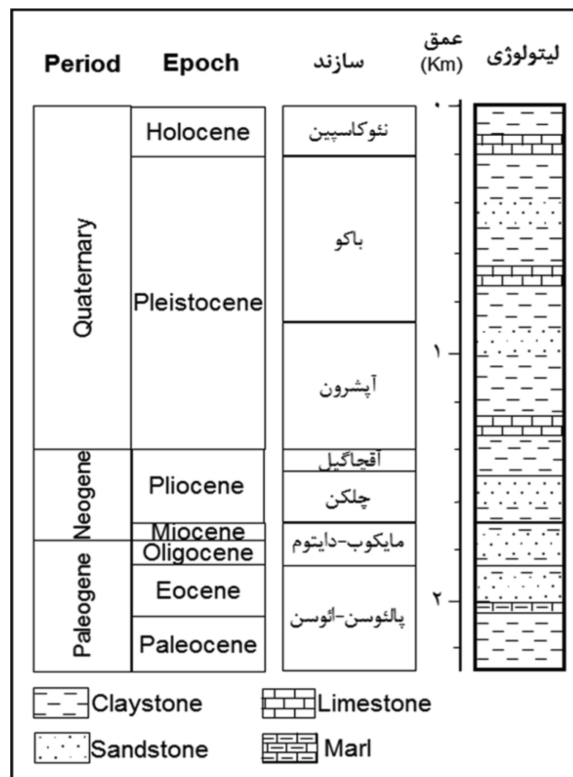


شکل ۱ موقعیت دشت‌گرگان در تقسیم‌بندی استانی الف)، پدیده‌های زمین‌شناسی منطقه ب) [براساس ۴] و موقعیت چاه‌های مورد مطالعه پ)

باوجود قدمت زیاد فعالیت‌های اکتشاف منابع نفتی در این منطقه، رسوبات این منطقه نیاز به مطالعه و معرفی دارند. دشت‌گرگان با رسوبات سخت نشده و سست عهد حاضر پوشیده شده [۱] و رخنمون لایه‌ها در این دشت وجود ندارد. عمده شناختی که از لایه‌های این منطقه وجود دارد مربوط به لایه‌های پلیوسن و جوان‌تر است (شکل ۲). از لایه‌های پالئوسن-میوسن در این منطقه داده‌های محدودی منتشر شده است [از جمله ۲، ۳، ۴]. گسترش لایه‌های مزوزوئیک در دشت‌گرگان با ابهاماتی همراه است اما مطالعاتی در شرق و جنوب دشت‌گرگان روی سازند آیتامیر (آلبین-سنومانین) [۵] و سازند شمشک (تریاس بالایی و ژوراسیک میانی) انجام شده است [۶، ۷]. در رسوبات سنوزوئیک این منطقه، سیمان‌شدگی ضعیف است که این موجب شده امکان وجود رخنمون یا مغزه‌گیری از این لایه‌ها به‌راحتی میسر نباشد. همچنین، کاهش ضخامت یا عدم وجود لایه‌ها به‌سمت حاشیه دشت (کوه‌های البرز و شرق منطقه) وجود دارد [۴] که با تغییرات قابل توجهی در رخساره‌های رسوبی همراه است [۸]. مدل‌سازی حوضه کاربردهای مختلفی در مطالعه مناطق زمین‌شناسی دارد. از جمله این کاربردها، بررسی فرآیند نفتزایی سنگ منشأ [۹]، تأثیر چین‌خوردگی بر فرآیند نفتزایی سنگ‌های منشأ [۱۰-۱۲] و مطالعه اثر گسل‌های تراستی بر فرآیند نفتزایی [۱۳] است. در این مطالعه از مدل‌سازی حوضه برای بررسی نرخ‌های رسوب‌گذاری و فرونشست در دشت‌گرگان استفاده شده است. هنگامی‌که رسوبات با نرخ‌های بالا نهشته شوند، فشردگی به‌شکل همگن در توالی عمودی یا به‌شکل جانبی انجام نمی‌شود. نرخ‌های بالای رسوب‌گذاری و تراوایی پایین رسوباتی مانند شیل‌ها باعث می‌شود سیالات در تخلخل رسوبات محبوس شده و فشار هیدرواستاتیک افزایش یابد. افزایش فشار هیدرواستاتیک می‌تواند منجر به شکسته شدن سنگ‌ها شود. هنگامی‌که رسوبات شکل‌پذیر وجود داشته باشند، افق‌های پرفشار[1] و فرآیند نفتزایی منجر به تشکیل گل‌فشان می‌شود [۱۴].

1. High-Pressure Zone

پژوهش نفت شماره ۱۲۶، آذر و دی ۱۴۰۱، صفحه ۸۲-۷۷



شکل ۲ ستون چینه‌شناسی دشت‌گرگان [براساس ۴]

تغییـرات ناحیــه‌ای نرخهــای رســوب‌گذاری می‌توانـد الگـوی گسـترش افق‌هـای پرفشـار را نشـان دهـد [۱۵]؛ بنابرایــن مطالعــه نرخهــای رســوب‌گذاری می‌توانـد روشـی بـرای بررسـی امـکان وجـود و گسـترش لایه‌هـای پرفشـار در منطقـه و کاهـش ریسـک‌های حفـاری باشـد [۱۶]. افق‌هـای پرفشـار می‌تواننـد در فرآیندهـا و عناصـر سیســتم‌نفتی ازجملــه پختگــی ســنگ منشــأ [۱۷]، مهاجـرت هیدروکربـن [۱۸]، کیفیـت مخـزن [۱۹، ۲۰] و کیفیـت سـنگ پـوش [۲۱] تأثیرگـذار باشـند.

زمین‌شناسی منطقه

دشــت‌گرگان بخشــی از حوضه‌خزرجنوبــی[1] در نظـر گرفتـه می‌شـود. ایـن حوضـه حاصـل گسـلش پشـت قوسـی در زمـان ژوراسـیک میانی-کرتاسـه ابتدایی اسـت [۲۲، ۲۳]. بــا حرکــت صفحــه عربــی به‌ســمت شــمال شــرق در اواخــر ائوســن-ابتدای الیگوســن و همچنیــن افـت سـطح آب، ارتبـاط دریـای خـزر بـا دریاهـای آزاد قطـع شـده [۲۴-۲۷] پـس از اتصـال موقـت در پلیوسـن بالایــی [۲۶]، حوضه‌خزرجنوبــی تــا زمــان حــال بــا آب‌هــای آزاد ارتبــاط نــدارد. پی‌ســنگ دشــت‌گرگان، رســوبات ژوراسـیک-کرتاسـه اسـت کـه در کپـه داغ بالاآمـده اسـت [۲۸]. حرکـت صفحـه عربـی موجـب دو فـاز تکتونیکـی در الیگو-میوسـن و پلیوسـن-عهدحاضر شـده کـه فـاز دوم موجـب بالاآمدگـی کوه‌هـای قفقاز، البـرز و کپــه‌داغ شــده اســت [۲۲، ۲۷]. مــرز رســوبات ســنوزوئیک بــا لایه‌هــای پایین‌تــر دگرشــیب اســت [۲۹] و ضخامــت ایــن رســوبات به‌ســمت مرکــز حوضه‌خزرجنوبــی افزایــش می‌یابــد [۴]. در شــرق و جنــوب دشــت‌گرگان، رســوبات پالئوسن-پلیوســن به‌شــکل آنلــپ روی رســوبات کرتاســه قــرار می‌گیرنــد [۳۰]. نهشــته‌های پالئوســن دریایــی و نهشــته‌های میوسـن نیمـه دریایـی اسـت و در زمـان نهشـته شـدن ایـن رسـوبات، حوضـه خـزر جنوبـی از طریـق قفقـاز میانـی بـا آب‌هـای آزاد ارتبـاط داشـته اسـت [۲، ۳]. سـپس رسـوبات عمدتـاً رودخانـه‌ای و دلتایی پلیوسـن و جوان‌تـر تشکیل‌شـده‌اند کـه شـامل سـازندهای چلکـن (پلیوســن پایینــی)، رســوبات نیمــه دریایــی آقچاگیــل (پلیوســن بالایــی)، آپشـرون (پلیستوســن پایینــی)، باکــو (پلیستوســن بالایــی) و نئوکاسپین (هلوســن) اســت [۲، ۸، ۳۱] (شــکل ۲). مطالعاتــی بــرروی نانوفســیل‌های نهشــته‌های ســنوزوئیک در دشــت‌گرگان انجــام شــده و ســن ســازندهای آقچاگیــل و آپشــرون به‌ترتیــب پلیوســن بالایی-پلئیستوسـن پایینـی و پلئیستوسـن میانـی تعییـن شـده اسـت [۳۱]. تعییـن سـن رسـوبات به‌علـت عـدم وجـود فسـیل‌های شـاخص بـا ابهاماتـی روبـرو اسـت. بـه همیـن علـت، مطالعـه وجـود فرسـایش یـا عـدم رسـوب‌گذاری را بـا عـدم قطعیـت مواجـه می‌کنـد. رسـوبات سیلیسـی آواری پالئوسـن در جنـوب نـکاه (بـرش سـوچلما) از مـارن و ماسه‌سـنگ‌های نـازک لایـه تشـکیل شـده و در محیـط رسـوبی کم‌عمـق تـا عمیـق نهشـته شـده اسـت [۲].

1. South Caspian Basin

رسوبات پالئوسن-ائوسن در چاه حفاری شده در دشت‌گرگان از شیل سیاه تا خاکستری، رس‌سنگ، مارن و سیلتستون تشکیل شده و رسوبات الیگو-میوسن شامل شیل، رس‌سنگ و سنگ‌آهک است [۴]. براساس مطالعه شرفی و همکاران ۱۴۰۰ ب، سازند چلکن دارای بخش ماسه‌سنگی در پایین و لایه‌های گل‌سنگ در بالا است و با وجود تخلخل مناسب دارای پتانسیل سنگ مخزن منابع هیدروکربن است. همچنین براساس نانوفسیل‌های آهکی در بخش‌هایی از بازه زمانی نهشته شدن این سازند، ارتباط بین حوضه خزر و دریای سیاه وجود داشته است [۳۱]. سازند آقچاگیل متشکل از واحدهای ماسه‌سنگ در پایین و واحدهای کربناته دریایی در بالا است و با داشتن تخلخل مناسب دارای پتانسیل مخزن هیدروکربن است و سازند آپشرون دارای لایه‌های ماسه‌سنگ در پایین و گل‌سنگ در بالا است [۸، ۳۱]. رسوبات باکو و نئوکاسپین شامل رس‌سنگ، سنگ‌آهک و ماسه‌سنگ است [۴]. افق‌های پرفشار در بخش‌های مختلفی از حوضه‌خزرجنوبی دیده می‌شود که دارای روند کاهشی از سمت مرکز و شمال غرب حوضه به‌سمت شمال شرق است [۳۲]. رسوبات ضخیم و فشرده نشده، حاصل نرخ رسوب‌گذاری بالا در منطقه هستند. سیالاتی که در افق‌های پرفشار وجود دارند، می‌توانند منجر به تشکیل گل‌فشان یا گنبدهای گلی شوند [۳۳]. تعداد ۴۰۰ گل‌فشان فعال در حوضه‌خزرجنوبی گزارش‌شده است که عمدتاً در بخش‌های ساحلی آذربایجان و ترکمنستان دیده می‌شوند [۳۴]. همچنین میدان‌های گازی و نفتی در بخش‌های شرقی و غربی حوضه وجود دارد. در دشت‌گرگان، چهار گل‌فشان فعال و گل‌فشان‌های خاموش متعددی وجود دارد [۳۵]. گل‌فشان‌های حوضه‌خزرجنوبی را مرتبط با تاقدیس‌ها و تجمعات نفتی دانسته‌اند [۱۴، ۳۴]. در گزارش چاه‌های حفاری شده، وجود افق‌های پرفشار اشاره شده برای مثال افق پرفشار در سازند چلکن چاه گرگان ۳ گزارش شده است [۳۶]. همچنین، وجود گل‌فشان‌ها شواهدی از وجود لایه‌های پرفشار در لایه‌های زیرین است. وجود لایه‌های غنی از ماده آلی در سازند شمشک کوه‌های البرز این تصور را به وجود آورده بود که این سازند در دشت‌گرگان گسترش داشته و سنگ منشأ مؤثری در سیستم‌نفتی و تشکیل منابع هیدروکربنی است [۳۷]. عمق تدفین لایه‌های ژوراسیک و وجود لایه‌های شمشک در چاه‌های قزل تپه ازجمله شواهدی بودند که این ایده را تقویت می‌کردند و به نظر می‌رسد چاه‌های حفاری شده در این منطقه با تصور وجود سیستم‌نفتی ژوراسیک در این منطقه حفاری‌شده‌اند؛ اما نبود منابع هیدروکربن در چاه‌های حفاری شده، عدم وجود یا ناقص عمل کردن سیستم‌نفتی ژوراسیک در دشت‌گرگان را نشان می‌دهد.

روش مطالعه

در این مطالعه برای محاسبه نرخ‌های رسوب‌گذاری و فرونشست از مدل‌سازی یک‌بعدی حوضه استفاده شده است. از نرم‌افزارهای تمیس[1] (زیرمجموعه نرم‌افزارهای Open Flow) و جنکس[2] شرکت بیسیب فرنلب[3] برای ترسیم نمودارهای تاریخچه تدفین و نمودارهای نرخ‌های رسوب‌گذاری استفاده شده است. در دشت‌گرگان، ضخامت سازندها به طرف ساحل خزر افزایش می‌یابد، ازآنجاکه چاهی در این منطقه حفاری نشده است براساس داده‌های لرزه‌ای موجود از منطقه، چاه فرضی در نظر گرفته شده است. با توجه به اختلاف ضخامت قابل توجه در رسوبات سنوزوئیک چاه گرگان ۳a در نزدیکی گل‌فشان قارنیاریق و چاه فرضی در نزدیکی گل‌فشان نفتلیچه، مدل‌سازی یک‌بعدی این چاه‌ها انجام شده است. با وجود فاصله کم بین این دو چاه (کمتر از ۴۰ km)، اختلاف ضخامت رسوبات سنوزوئیک در این دو چاه حدود ۳۳۷۰ m است.

داده‌های چاه‌های مورد مطالعه در نرم‌افزار وارد شده که شامل عمق سر سازندها، لیتولوژی سازندها و سن لایه‌ها است. تعیین سن زمین‌شناسی لایه‌ها براساس مطالعه‌ای بوده که در پژوهشگاه‌صنعت‌نفت انجام شده [۴] و سن عددی با استفاده از جدول زمان‌زمین‌شناسی [۳۸] استخراج شده است. داده‌های عمق چاه فرضی از داده‌های لرزه‌ای و لیتولوژی از اطلاعات منطقه‌ای استخراج شده است. نرم‌افزار مدل‌سازی حوضه، تغییرات ضخامت و تخلخل لایه‌ها از زمان رسوب‌گذاری تا زمان حال را محاسبه می‌کند. با داشتن میزان تخلخل می‌توان نرخ‌های رسوب‌گذاری مانند نرخ رسوب‌گذاری تصحیح‌نشده[۴]، نرخ رسوب‌گذاری جامد[۵] و نرخ رسوب‌گذاری کل[۶] را براساس رابطه‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ محاسبه کرد [۳۹، ۴۰]. نرخ رسوب‌گذاری تصحیح‌نشده با در نظر گرفتن ضخامت زمان حال لایه و با استفاده از رابطه ۱ محاسبه می‌شود:

$$uR = \frac{T_P}{A}(m/Ma) \tag{۱}$$

در این رابطه A مدت‌زمان نهشته شدن لایه به میلیون سال، T_p ضخامت زمان حال لایه به متر و uR نرخ رسوب‌گذاری تصحیح‌نشده است. تصحیح فشردگی لایه بر اثر بار رسوبی در طی تاریخچه تدفین در این نرخ لحاظ نشده است. در محاسبه نرخ رسوب‌گذاری جامد با حذف میزان تخلخل سنگ، ضخامت لایه هنگامی‌که تخلخل ندارد (تخلخل ۰٪) به‌دست می‌آید و از رابطه ۲ محاسبه می‌شود. ازآنجاکه در این نرخ، میزان فشردگی لایه طی تاریخچه تدفین تأثیرگذار نیست، می‌توان برای مقایسه لایه‌های مختلف در اعماق متفاوت از آن استفاده کرد.

$$R_{\Phi=0} = \frac{T_N}{A}(m/Ma) \tag{۲}$$

که A مدت‌زمان نهشته شدن لایه به میلیون سال و T_N ضخامت لایه با تخلخل ۰٪ است. در محاسبه نرخ رسوب‌گذاری کل، ضخامت لایه بعد از نهشته شدن در نظر گرفته می‌شود و از رابطه ۳ محاسبه می‌شود.

$$R_T = \frac{T_O}{A}(m/Ma) \tag{۳}$$

که در این رابطه T_o ضخامت اولیه لایه است هنگامی‌که فرآیند فشردگی صورت نگرفته است. در طی نهشته شدن رسوبات، براثر بار رسوبات و نیروهای زیرسطحی، فرونشست پی‌سنگ رخ می‌دهد. در طی زمان زمین‌شناسی نرخ فرونشست تغییر می‌کند و برای محاسبه آن نیاز است تغییرات عمق محیط رسوبی و تغییرات جهانی سطح آب دریا در نظر گرفته شود. نرخ فرونشست کل از معادله ۴ محاسبه می‌شود.

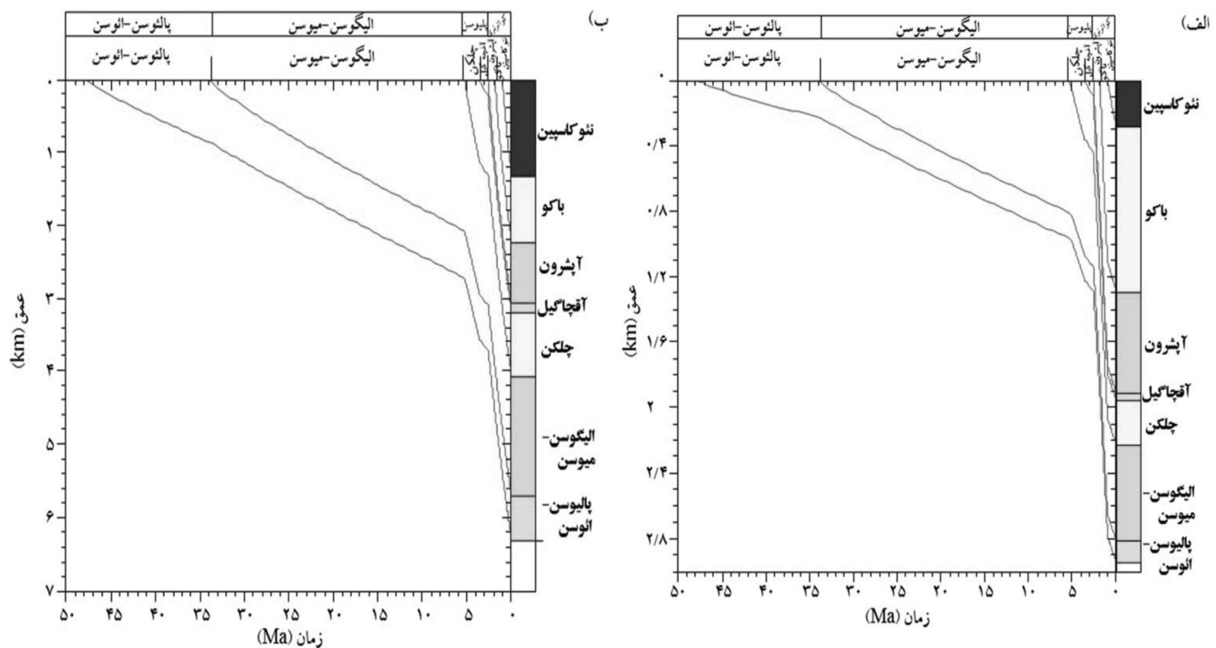
$$R_S = R - \frac{\Delta(W+E)}{A} m/Ma \tag{۴}$$

W تغییرات عمق محیط رسوبی و E تغییرات سطح دریا در طی نهشته شدن لایه است.

نتایج و بحث

نمودارهای تاریخچه تدفین چاه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهند، رسوبات پالئوسن تا میوسن (از ۴۷/۸ تا ۵/۸ Ma) نرخ تدفین پایین‌تری نسبت به رسوبات جوان‌تر دارند، سپس رسوبات پلیوسن و جوان‌تر (سازند چلکن و رسوبات جوان‌تر) با نرخ‌های بالاتری نهشته شده‌اند و نمودارهای تاریخچه تدفین شیب تندی را نشان می‌دهند (شکل ۳). ضخامت رسوبات سنوزوئیک در چاه‌های گرگان a ۳ و چاه فرضی به‌ترتیب ۲۹۴۳ و ۶۳۲۰ m است (جدول ۱). که نشان‌دهنده افزایش ضخامت توالی رسوبات تا حدود دو برابر در چاه فرضی است. درحالی‌که فاصله چاه‌ها کمتر از ۴۰ km است که نشان‌دهنده افزایش نرخ رسوب‌گذاری و ضخامت سازندها به‌سمت ساحل دشت‌گرگان است.

1. Temis
2. Genex
3. Beicip Franlab
4. Uncorrected Sedimentation Rate
5. Solid Sedimentation Rate
6. Total Sedimentation Rate



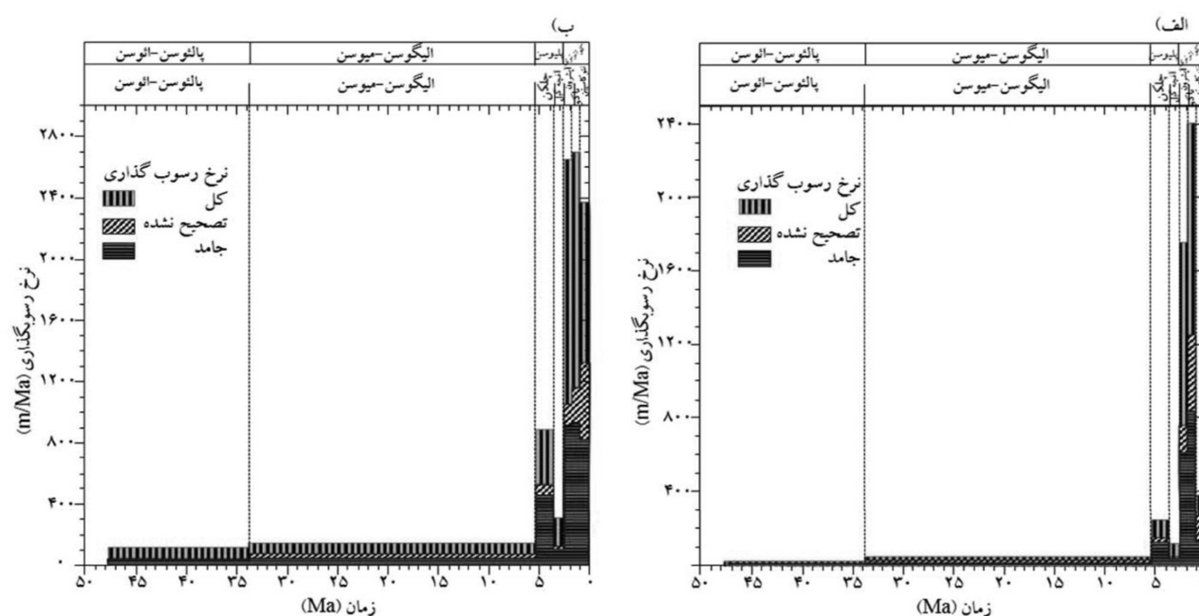
شکل ۳ نمودار تاریخچه تدفین چاه گرگان a ۳ الف) و تاریخچه تدفین چاه فرضی ب)

جدول ۱ داده‌های سن، عمق سازندها و نرخ‌های رسوب‌گذاری در چاه گرگان a ۳ و چاه فرضی

سازند	سن سطح پایینی (Ma)	مدت‌زمان (Ma)	چاه فرضی					چاه گرگان a ۳				
			عمق (m)	ضخامت (m)	نرخ رسوب‌گذاری (m/Ma)			عمق (m)	ضخامت (m)	نرخ رسوب‌گذاری (m/Ma)		
					تصحیح‌نشده	جامد	کل			تصحیح‌نشده	جامد	کل
نئوکاسپین	۱	۱	۰	۱۳۲۰	۱۳۲۰	۸۳۱	۲۳۷۴	۰	۲۸۵	۲۸۵	۱۳۷	۳۹۱
باکو	۱/۸	۰/۸	۱۳۲۰	۹۲۰	۱۱۵۰	۹۴۴	۲۶۹۷	۲۸۵	۱۰۱۰	۱۲۶۳	۸۴۴	۲۴۱۱
آپشرون	۲/۶	۰/۸	۲۲۴۰	۸۴۰	۱۰۵۰	۹۲۶	۲۶۴۷	۱۲۹۵	۶۱۵	۷۶۹	۶۱۵	۱۷۵۸
آقچاگیل	۳/۶	۱	۳۰۸۰	۱۲۰	۱۲۰	۱۰۸	۳۰۹	۱۹۱۰	۵۰	۵۰	۴۲	۱۲۱
چلکن	۵/۳	۱/۷	۳۲۰۰	۸۸۰	۵۱۸	۴۶۸	۸۸۳	۱۹۶۰	۲۶۵	۱۵۶	۱۳۲	۲۴۹
الیگو-میوسن	۳۳/۹	۱۹/۴	۴۰۸۰	۱۶۴۰	۸۵	۵۴	۱۵۲	۲۲۲۵	۵۸۵	۳۰	۱۸	۵۱
پالئو-ائوسن	۴۷/۸	۱۳/۹	۵۷۲۰	۶۰۰	۴۳	۴۰	۱۱۸	۲۸۱۰	۱۳۳/۶	۱۰	۹	۲۵
			۶۳۲۰					۲۹۴۳/۶				

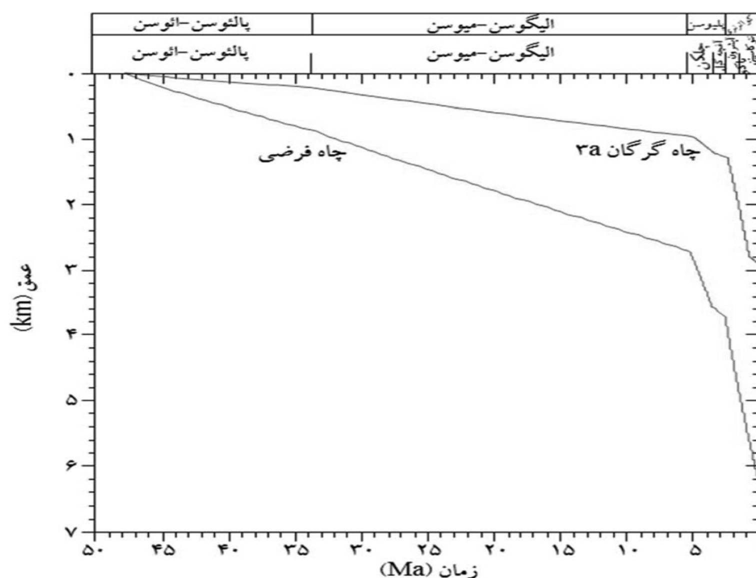
کمترین نرخ‌های رسوب‌گذاری در رسوبات پالئوسن تا میوسن دیده می‌شود به‌طوری‌که نرخ رسوب‌گذاری جامد رسوبات پالئوسن-ائوسن ۹ و ۴۰ m/Ma به‌ترتیب در چاه گرگان a ۳ و چاه فرضی است (جدول ۱). این نرخ‌ها نشان‌دهنده افزایش نرخ به‌سمت چاه فرضی و مرکز حوضه‌خزرجنوبی است. با وجود افزایش نرخ‌های رسوب‌گذاری به‌سمت چاه فرضی، رسوبات باکو ضخامت کمتری در این چاه نسبت به چاه گرگان a ۳ دارد. این سازند، با ضخامت ۹۲۰ m در چاه فرضی و ۱۰۱۰ m در چاه گرگان a ۳ به‌ترتیب دارای نرخ‌های رسوب‌گذاری جامد ۹۴۴ و ۸۴۴ m/Ma است که بالاترین نرخ‌های رسوب‌گذاری جامد در چاه‌های مورد مطالعه است (شکل ۴).

پژوهش نفت شماره ۱۲۶، آذر و دی ۱۴۰۱، صفحه ۸۲-۷۷



شکل ۴ نرخ‌های رسوب‌گذاری در چاه گرگان a ۳ الف) و چاه فرضی ب)

باوجود ضخامت بیشتر این رسوبات در چاه گرگان a ۳ اما نرخ رسوب‌گذاری جامد نسبت به چاه فرضی کمتر است. علت آن عمق تدفین کمتر (ضخامت سازند نئوکاسپین) و فشردگی کمتر سازند باکو در چاه گرگان a ۳ است. در محاسبه نرخ رسوب‌گذاری جامد ضخامت سازند با تخلخل صفر لحاظ می‌شود (رابطه ۲). همچنین نرخ رسوب‌گذاری کل سازند باکو در چاه فرضی بالاتر است (۲۶۹۷ و ۲۴۱۱ m/Ma به‌ترتیب در چاه فرضی و گرگان a ۳). نمودارهای نرخ فرونشست نشان می‌دهند شکل ۵ که فرونشست پی‌سنگ در زمان نهشته شدن رسوبات پالئوسن-میوسن (۴۷/۸ تا ۵/۳ Ma) حدود ۹۵۰ و ۲۶۵۰ m به‌ترتیب در چاه گرگان a ۳ و چاه فرضی است. تفاوت میزان نهشته شدن رسوبات در دو چاه مورد مطالعه موجب اختلاف نرخ‌های فرونشست شده است. با شروع رسوب‌گذاری سازند چلکن و رسوبات جوان‌تر (۵/۳ Ma تا زمان حال)، فرونشست با نرخ‌های بالاتری رخداده و طی این مدت، میزان فرونشست ۲۰۰۰ و ۳۵۵۰ m به‌ترتیب در چاه گرگان a ۳ و چاه فرضی است. تغییر محیط رسوبی دریایی پالئوسن-میوسن به محیط رودخانه‌ای-دلتایی-دریاچه‌ای رخ داده و موجب نهشته شدن رسوبات عمدتاً آواری رودخانه‌ای-دلتایی سازندهای چلکن و جوان‌تر با نرخ بالایی شده است. این واقعه هم‌زمان با شدت گرفتن فعالیت‌های کوه‌زایی و جدایش حوضه خزر از آب‌های آزاد است [۲۲، ۲۷]. حرکت صفحه عربی در زمان پلیوسن-عهدحاضر موجب بالاآمدگی کوه‌های قفقاز، البرز و کپه‌داغ شده است [۲۲، ۲۷]. این فعالیت کوه‌زایی موجب تأمین رسوبات و نهشته شدن لایه‌های ضخیم و نرخ‌های فرونشست بالا شده است. نرخ‌های رسوب‌گذاری لایه‌ها نشان‌دهنده روند افزایشی کلی از پالئوسن تا سازند باکو در هر دو چاه است. سازندهای آقچاگیل و نئوکاسپین از این روند افزایشی پیروی نمی‌کنند. سازند آقچاگیل در پلیوسن بالایی در طی اتصال مجدد دریاچه خزر به آب‌های آزاد، نهشته شده [۲۶] و تغییرات ضخامت کمتری نسبت به سایر سازندها در دشت‌گرگان، نشان می‌دهد [۴]. تغییر ناگهانی محیط رسوبی از محیط رودخانه‌ای-دریاچه‌ای به محیط دریایی می‌تواند علت نرخ‌های پایین‌تر رسوب‌گذاری در سازند آقچاگیل باشد.



شکل ۵ نمودار فرونشست تکتونیکی در چاه‌های مورد مطالعه

سازند نئوکاسپین دارای ضخامت ۱۳۲۰ m در چاه فرضی و ۲۸۵ m در چاه گرگان ۳ a است (جدول ۱). این اختلاف ضخامت زیاد موجب بیشترین اختلاف نرخ رسوب‌گذاری محاسبه شده در دو چاه شده است. این سازند، از روند افزایشی نرخ رسوب‌گذاری در رسوبات قدیمی‌تر پیروی نمی‌کند (جدول ۱). در چاه فرضی دارای نرخ‌های رسوب‌گذاری بالا است، اما در چاه گرگان ۳ a کاهش قابل توجهی در نرخ‌های رسوب‌گذاری این سازند رخ داده که نشان‌دهنده رسوب‌گذاری سریع‌تر در بخش‌های ساحلی دشت‌گرگان است. به‌علت کاهش فضای تجمع یا کاهش ورود رسوبات به منطقه، در بخش‌های نزدیک‌تر به منشأ رسوبات (چاه گرگان ۳ a)، نرخ رسوب‌گذاری بسیار پایین‌تر است. تمرکز رسوب‌گذاری در غرب دشت‌گرگان می‌تواند نشان‌دهنده تغییر الگوی رسوب‌گذاری در زمان نهشته شدن رسوبات نئوکاسپین در منطقه باشد. رسوبات کواترنر و پلیوسن دشت‌گرگان با نرخ‌های بسیار بالایی نهشته شده‌اند. بااین‌وجود، در بخش‌های آبی حوضه‌خزرجنوبی رسوبات جوان‌تر از میوسن، ضخامت بیش از ۱۰ km دارند [۴۱، ۴۲] و نرخ رسوب‌گذاری تا حد ۴/۵ km/Ma گزارش شده است [۴۳]. درحالی‌که ضخامت این رسوبات در دشت‌گرگان به حدود ۴ km می‌رسد [۴]. رسوبات معادل چلکن در ناحیه ساحلی ترکمنستان و آذربایجان، با ضخامت حدود ۶ km در طی ۲ تا ۳ Ma نهشته شده است [۴۴، ۴۵]. می‌توان نتیجه گرفت با وجود بالا بودن نرخ در رسوبات پلیوسن و جوان‌تر دشت‌گرگان، به‌سمت مرکز حوضه‌خزرجنوبی نرخ‌های رسوب‌گذاری افزایش یافته است. نرخ‌های رسوب‌گذاری بالا موجب عدم یکنواختی میزان فشردگی رسوبات در طی تدفین می‌شود. در نتیجه افق‌های پرفشار تشکیل می‌شود که در این افق‌ها، تخلخل اولیه کمتر تحت تأثیر فشردگی رسوبات قرار می‌گیرد [۱۴]؛ بنابراین در مناطقی که افق‌های پرفشار وجود دارند می‌توان انتظار ویژگی‌های مخزنی بهتری را داشت و رسوبات می‌توانند باوجود عمق تدفین زیاد، تخلخل و تراوایی مناسبی داشته باشند. وجود افق‌های پرفشار می‌تواند موجب تأخیر در فرآیند نفت‌زایی گردد [۱۷]. همچنین افق‌های پرفشار موجب افزایش ریسک حفاری و وقوع حوادث هنگام حفر چاه می‌شود؛ مانند فوران چاه گرگان ۳ در عمق ۲۰۹۰ m (گزارش منتشر نشده حفاری چاه

پژوهش نفت شماره ۱۲۶، آذر و دی ۱۴۰۱، صفحه ۸۲-۷۷

گرگان ۳ [۳۶]). نرخ رسوب‌گذاری بالا، عدم سیمانی شدن رسوبات و وجود رسوبات رسی و ماسه‌ای سخت نشده، همچنین وجود لایه‌های سنگ منشأ که هیدروکربن‌زایی کرده‌اند، از جمله عواملی هستند که موجب تشکیل گل‌فشان‌هایی مانند گل‌فشان قارنیاریق، نفتلیچه و سوفیکم در دشت‌گرگان شده‌اند.

نتیجه‌گیری

رسوبات پلیوسن-عهد حاضر شامل سازندهای چلکن، آقچاگیل، آپشرون، باکو و نئوکاسپین با نرخ بالایی نهشته شده‌اند. این رسوبات در دشت‌گرگان به‌سمت دریای خزر با افزایش ضخامت به حدود ۴۰۸۰ m می‌رسد. جدول ۱ نهشته شدن این رسوبات، همراه با نرخ فرونشست بالا و همزمان با افزایش فعالیت‌های کوه‌زایی و جدایش دریای خزر از آب‌های آزاد است. نرخ‌های رسوب‌گذاری نهشته‌های سنوزوئیک به‌سمت بخش ساحلی دشت‌گرگان افزایش می‌یابد.

نرخ نهشته شدن سازند نئوکاسپین در چاه‌های مورد مطالعه، نشان‌دهنده ادامه بالا بودن نرخ ته‌نشینی رسوبات در بخش‌های ساحلی دشت‌گرگان و کاهش این نرخ به‌سمت چاه گرگان a ۳ است.

کمترین نرخ رسوب‌گذاری در نهشته‌های پالئوسن-ائوسن (نرخ رسوب‌گذاری جامد ۹ m/Ma) و بیشترین نرخ در سازند باکو (نرخ رسوب‌گذاری جامد ۹۴۴ m/Ma) است.

نرخ‌های رسوب‌گذاری بالا از عوامل شکل‌گیری افق پرفشار و گل‌فشان در ناحیه است. همچنین این نرخ‌ها می‌توانند تأثیر قابل توجهی بر سیستم‌نفتی داشته باشند. مطالعه نرخ‌های رسوب‌گذاری در گستره دشت‌گرگان و تهیه نقشه‌های نرخ‌های رسوب‌گذاری و فرونشست و بررسی تأثیر آن‌ها بر فرآیندها و عناصر سیستم‌نفتی می‌تواند کمک شایانی در پیشبرد اهداف اکتشاف منابع هیدروکربنی منطقه، باشد.

مراجع

[1] . Asadi S, Moore F, Keshavarzi B (2012) The nature and provenance of Golestan loess deposits in Northeast Iran, Geological Journal, 48: 646-660.

[۲]. شرفی م، مرادپور م، بیرانوند ب، کهنسال پ، عبدالهی ا، طاعتی ف، مهاجر ح (۱۳۹۸) محیط رسوبی و چینه‌نگاری سکانسی یک سیستم بادبزن دریایی ژرف (پالئوسن)، البرز شمالی (ناحیه سوچلما)، دوفصلنامه رسوب‌شناسی کاربردی، ۷: ۳۴-۲۰.

[۳]. شرفی م، زینل‌زاده ا، بایت گل ئ، بیرانوند ب، مرادپور م، طاعتی ف (۱۴۰۰) توسعه سیستم رسوبی دلتایی (میوسن) در حوضه خزر جنوبی، فصلنامه علمی علوم زمین، ۳۱: ۹۴-۸۳.

[4]. Zeinalzadeh A, Sharafi M, Mirshahani M, Shirzadi A (2021) Source rock evaluation and basin modelling in the Gorgan Plain, SE South Caspian Basin, Northern Iran, Journal of Petroleum Geology, 44: 509-529.

[۵]. شرفی م، بیرانوند ب، زینل‌زاده ا، بایت گل ئ، مرادپور م، کهنسال پ (۱۴۰۰) رخساره‌ها و محیط رسوبی سازند آیتامیر در دشت‌گرگان: مدلی از محیط حاشیهٔ ساحلی زیر نفوذ امواج، پژوهش‌های چینه‌نگاری و رسوب‌شناسی، ۳۷: ۶۷-۵۱.

[6]. Rad F K (1986) A jurassic delta in the eastern Alborz, NE Iran, Journal of Petroleum Geology, 9: 281-294.

[7]. Shekarifard A, Baudin F, Seyed-Emami K, Schnyder J, Laggoun-Defarge F, Riboulleau A, Brunet M-F, Shahidi A (2012) Thermal maturity of the upper triassic–middle Jurassic Shemshak Group (Alborz Range, Northern Iran) based on organic petrography, geochemistry and basin modelling: implications for source rock evaluation and petroleum exploration, Geological Magazine, 149: 19-38.

[8]. Soltani B, Beiranvand B, Moussavi-Harami R, Honarmand J, Taati F (2020) Facies analysis and depositional setting of the upper pliocene Akchagyl Formation in southeastern Caspian Basin, NE Iran, Carbonates and Evaporites, 35: 8.

[۹]. زینل‌زاده ا (۱۳۹۰) ارزیابی سنگ‌های منشأ کژدمی و گدوان در چاه بی‌بی‌حکیمه ۱۲۰، پژوهش نفت، ۶۵، ۲۱: ۸۱-۷۱.

[۱۰]. زینل‌زاده ا، موسوی‌حرمی س ر، محبوبی ا (۱۳۹۷) بررسی فرآیند نفت‌زایی سنگ منشأ کژدمی در گستره ناحیه‌تغذیه میدان دارخوین در دشت‌آبادان، پژوهش نفت، ۲۸، ۲: ۵۸-۴۶.

[۱۱]. زینل‌زاده ا (۱۳۸۹) مدل‌سازی حرارتی یک‌بعدی رخنمون‌های سطحی، مثالی از کوه خامی و کوه میش، پژوهش نفت، ۶۱، ۲۰: ۸۷-۷۷.

[12]. Zeinalzadeh A (2020) Influence of folding on hydrocarbon generation: an example from the dezful embayment, Journal of Petroleum Science and Technology, 10: 30-38.

[۱۳]. زینل‌زاده ا، موسوی‌حرمی س، کسایی نجفی م، میرشاهانی م (۱۳۹۴) مدل‌سازی فرآیند نفت‌زایی سنگ منشأ در مقاطع تراستی: مثالی از حوضه زاگرس، پژوهش نفت، ۲۵، ۸۳: ۱۴۸-۱۳۷.

[14]. Mazzini A, Etiope G (2017) Mud volcanism: An updated review, Earth-Science Reviews, 168: 81-112.

[15]. Nifuku K, Kobayashi Y, Araki Y, Ashida T, Taniwaki T (2021) Overpressure evolution controlled by spatial and temporal changes in the sedimentation rate: Insights from a basin modelling study in offshore Suriname, Basin Research, 33: 1293-1314.

[16]. Mouchet J P, Mitchell A (1989) Abnormal pressures while drilling: origins, prediction, detection, evaluation, Technip Editions, 2.

[17]. Fang H, Yongchuan S, Sitian L, Qiming Z (1995) Overpressure retardation of organic-matter maturation and petroleum generation: a case study from the yinggehai and qiongdongnan basins, South China Sea1, AAPG Bulletin, 79: 551-562.

[18]. Hantschel T, Kauerauf A I (2009) Fundamentals of basin and petroleum systems modeling, Springer, 476.

[19]. Bloch S, Lander R H, Bonnell L (2002) Anomalously high porosity and permeability in deeply buried sandstone reservoirs: Origin and predictability, American Association of Petroleum Geologists, 86: 301-328.

[20]. Stricker S, Jones S J, Sathar S, Bowen L, Oxtoby N (2016) Exceptional reservoir quality in HPHT reservoir settings: Examples from the Skagerrak Formation of the Heron Cluster, North Sea, UK., Marine and Petroleum Geology, 77: 198-215.

[21]. Allen M B, Jones S, Ismail-Zadeh A, Simmons M, Anderson L (2002) Onset of subduction as the cause of rapid pliocene-quaternary subsidence in the South Caspian basin, Geology, 30: 775-778.

[22]. Brunet M F, Korotaev M V, Ershov AV, Nikishin AM (2003) The South Caspian Basin: a review of its evolution from subsidence modelling, Sedimentary Geology, 156: 119-148.

[23]. Golonka J, Yilmaz P O, Isaksen G H (2007) Geodynamic evolution of the South Caspian Basin, In: Yilmaz PO, Isaksen GH, (Eds): oil and gas of the greater Caspian Area, American Association of Petroleum Geologists 55: 17-41.

[24]. Schulz H M, Bechtel A, Sachsenhofer R F (2005) The birth of the Paratethys during the Early Oligocene: From Tethys to an ancient Black Sea analogue?, Global and Planetary Change, 49: 163-176.

[25]. Allen M, Armstrong H (2008) Arabia-Eurasia collision and the forcing of Mid-Cenozoic global cooling, Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 265: 52-58.

[26]. Rogl F (1999) Mediterranean and paratethys. facts and hypotheses of an oligocene to miocene paleogeography (short overview), Geologica Carpathica, 50: 339-349.

[27]. Popov S V, Rögl F, Rozanov A Y, Steininger F F, Shcherba I G, Kovac M (2004) Lithological-palaeogeographic maps of paratethys, CFS Courier Forschungsinstitut Senckenberg, 250: 1-46.

[28]. Omrani H, Raghimi M (2018) Origin of the mud volcanoes in the south east Caspian Basin, Iran, Marine and Petroleum Geology, 96: 615-626.

[29]. Radfar A, Chakdel A R, Nejati A, Soleimani M, FaridTaati (2019) New insights into the structure of the South Caspian Basin from seismic reflection data, Gorgan Plain, Iran, International Journal of Earth Sciences, 108: 379-402.

[30]. Robert A M M, Letouzey J, Kavoosi M A, Sherkati S, Müller C, Vergés J, Aghababaei A (2014) Structural evolution of the Kopeh Dagh fold-and-thrust belt (NE Iran) and interactions with the South Caspian Sea Basin and Amu Darya Basin, Marine and Petroleum Geology, 57: 68-87.

[۳۱]. شرفی م، موسوی ن، مرادپور م، بیرانوند ب، بایت گل ئ، مهاجر سلطانی ح (۱۴۰۰) سنگ‌شناسی و زیست چینه‌نگاری سازندهای آقچاگیل و آپشرون براساس نانوپلانکتون‌های آهکی در دشت‌گرگان: کاربرد در بازسازی جغرافیای دیرینه حوضه خزر جنوبی، دوفصلنامه رسوب‌شناسی کاربردی، ۹: ۱۱۲-۹۷.

[32]. Tagiyev M, Nadirov R, Bagirov E, Lerche I (1997) Geohistory, thermal history and hydrocarbon generation history of the north-west South Caspian Basin, Marine and Petroleum Geology, 14: 363-382.
[33]. Kopf A J (2002) Significance of mud volcanism, Reviews of Geophysics, 40: 2-1-2-52.
[34]. Jakubov A A, AliZade A A, Zeinalov M M (1971) Mud volcanoes of the Azerbaijan SSR: Atlas. Azerbaijan Academy of Sciences, Baku (in Russian).
[35]. Farhadian Babadi M, Mehrabi B, Tassi F, Cabassi J, Pecchioni E, Shakeri A, Vaselli O (2021) Geochemistry of fluids discharged from mud volcanoes, in SE Caspian Sea (Gorgan Plain, Iran), International Geology Review, 63: 437-452.
[36]. Paran Y, Donbali N (1963) Geological well completion report Gorgan-3 (Go-3).
[37]. Rad F K (1982) Hydrocarbon potential of the eastern Alborz region, NE Iran, Journal of Petroleum Geology, 4: 419-435.
[38]. Walker J D, Geissman J W, Bowring S A, Babcock L E (2013) The geological society of America geologic time scale, Geological Society of America Bulletin, 125: 259-272.
[39]. Van Hinte J E (1978) Geohistory analysis; application of micropaleontology in exploration geology, American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 62: 201-222.
[40]. Allen P, Allen R (2013) Basin analysis: principles and application to petroleum play assessment, Wiley-Blackwell; 3rd edition.
[41]. Goodwin N R J, Abdullayev N, Javadova A, Volk H, Riley G (2020) Diamondoids and basin modelling reveal one of the world›s deepest petroleum systems, South Caspian Basin, Azerbaijan, Journal of Petroleum Geology, 43: 133-149.
[42]. Baganz O W, Bagirov E, Michael G E, Shultz A (2012) Productive Series Play of the Paleo-Volga Delta, South Caspian Basin: Exploration History, Sedimentation, and Petroleum System. In: Baganz OWT, Bartov Y, Bohacs KM,Nummedal D, (Eds): Lacustrine sandstone reservoirs and hydrocarbon systems, American Association of Petroleum Geologists, AAPG Memoir 95, 57-70.
[43]. Smith Rouch L S (2006) Oligocene–Miocene Maykop/Diatom total petroleum system of the South Caspian Basin Province, Azerbaijan, Iran, and Turkmenistan, US Geological Survey Bulletin, 2201.
[44]. Green T, Abdullayev N, Hossack J, Riley G, Roberts A M (2009) Sedimentation and subsidence in the South Caspian Basin, Azerbaijan, Geological Society, London, Special Publications, 312: 241-260.
[45]. Reynolds A D, Simmons M D, Bowman M B J, Henton J, Brayshaw A C, Ali-Zade A A, Guliyev I S, Suleymanova S F, Ateava E Z, Mamedova D N, Koshkarly O (1998) Implications of outcrop geology for reservoirs in the Neogene Productive Series: Apsheron Peninsula, Azerbaijan1, AAPG Bulletin, 82: 25-49.

بازسازی تصویر سنگ مخزن متراکم با شبکه عصبی مولد رقابتی

علی کریمی و سعید صادق‌نژاد*

گروه مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۰۴

چکیده

بخش قابل توجهی از منابع هیدروکربنی ایران از مخازن شکاف‌دار با ماتریس سنگ متراکم تولید می‌شود. ساختار حفرات این مخازن، پیچیدگی‌های زیادی دارد و حفرات و گلوگاه‌های ریز در ابعاد نانومتری ذخیره هیدروکربن را به‌عهده دارند. با درک ساختار فضای متخلخل و بررسی جریان سیال درون حفرات ریز می‌توان دید بهتری از رفتار فضای متخلخل در مقیاس بزرگ به‌دست آورد. بررسی جریان سیال در سنگ مخزن نیازمند ساختارهای سه‌بعدی با دقت مناسب است. با این وجود استفاده از روش‌های مرسوم برای بازسازی شبکه حفرات پرهزینه است و از طرفی با پیچیده‌تر شدن این ساختارها توانایی این روش‌ها در بازسازی شبکه حفرات به‌طور چشم‌گیری کاهش می‌یابد. در سال‌های اخیر با پیشرفت در علوم کامپیوتر به ویژه هوش مصنوعی دروازه جدیدی به‌منظور بازسازی ساختارهای پیچیده به مانند سنگ مخزن گشوده شده است. با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین می‌توان مدل‌های سه‌بعدی با دقت بسیار بالا ایجاد و خواص پتروفیزیکی سنگ را از آن‌ها محاسبه کرد. یکی از این روش‌ها شبکه عصبی مولد رقابتی می باشد که توانایی خود در بازسازی شبکه حفرات را ثابت کرده است. در این پژوهش، از یک شبکه عصبی مولد رقابتی با لایه‌های همگشتی به‌منظور بازسازی تصاویر FIB-SEM یک سنگ مخزن متراکم در مقیاس حفره استفاده شده است. با استفاده از شبکه عصبی آموزش داده شده، تحقق‌های مختلفی از شبکه حفرات ساخته می‌شود. تخلخل و تراوایی تصاویر باز ساخته شده بسیار نزدیک به این خواص در نمونه تصویر واقعی بوده و دارای انحراف به‌ترتیب ۱/۰۷ و ۵/۲۴٪ برای تخلخل و تراوایی است. مشاهده می‌شود که شبکه عصبی مولد رقابتی تونایی بالایی در بازسازی شبکه حفرات دارد و می‌توان با کمک آن به بررسی شرایط سنگ مخزن در مقیاس حفره پرداخت.

کلمات کلیدی: بازسازی تصویر، مدل‌سازی شبکه حفرات، شبکه عصبی مولد رقابتی، سنگ مخزن متراکم، میکروسکوپ الکترونی باریکه یونی متمرکز

مقدمه

بخش قابل توجهی از منابع هیدروکربنی ایران از مخازن شکاف‌دار با سنگ ماتریس متراکم [1] (مخازن بنگستانی در جنوب غرب ایران) تولید می‌شود. از طرفی، ساختار شبکه حفرات ماتریس این مخازن پیچیدگی‌های زیادی دارد و معمولاً در مقیاس‌های مختلف ظاهر می‌شود.

*مسؤول مکاتبات
آدرس الکترونیکی sadeghnejad@modares.ac.ir
شناسه دیجیتال: (DOI:10.22078/PR.2022.4843.3165)

1. Tight

پژوهش نفت شماره ۱۲۶، آذر و دی ۱۴۰۱، صفحه ۹۴-۸۳

حفرات از ابعاد نانومتری در سنگ‌های متراکم تا میلی‌متر در سنگ‌های دارای تخلخل انحلالی (واگ) گسترده می‌شوند. مخازن متراکم نفتی معمولاً دارای تخلخل کمتر از ۱۰٪ و نفوذپذیری کمتر از ۰/۱ mD هستند. درک فضای متخلخل و پیش‌بینی خواص سنگ‌های متراکم یکی از چالش‌های مهم صنعت نفت است که با فهم صحیح خواص پتروفیزیکی در مقیاس ریز می‌توان دید بهتری از رفتار فضای متخلخل در مقیاس بزرگ به‌دست آورد. در سال‌های اخیر پیشرفت شگرف تجهیزات رایانه‌ای و تصویربرداری باعث گسترش هر چه بیشتر مدل‌سازی فضای متخلخل یا آنالیر مغزه دیجیتال[1] شده است. با کمک این تکنولوژی می‌توان بدون تولید از مخازن به بررسی فرآیندهای جابه‌جایی در مخزن در مقیاس حفره برای چنین سنگ‌هایی پرداخت. این روش‌ها امکان مشاهده پیچیدگی‌های مخزن را فراهم می‌آورند و از طرفی، قدرت بالایی در ساخت هندسه متخلخل و شبیه‌سازی جریان‌های چند فازی دارند. پیشرفت تکنولوژی عکس‌برداری سه‌بعدی مانند عکس‌های میکروسی‌تی‌اسکن ، نانوسی‌تی‌اسکن، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و عکس‌برداری باریکه یونی متمرکز (FIB-SEM) سبب گسترش استفاده از روش‌های آنالیز مغزه دیجیتال شده‌اند. میکرو سی تی اسکن سه‌بعدی، پرکاربردترین روش تصویربرداری است. با توجه به محدودیت ذاتی این دستگاه در تصویربرداری از حفرات مقیاس ریز و عدم دسترسی به تصاویر سه‌بعدی با وضوح بالا، گروهی از محققان اقدام به توسعه روش‌هایی برای ساخت مدل سه‌بعدی شبکه حفرات از تصاویر دو بعدی با وضوح بالا در ترکیب با تصاویر سه‌بعدی کرده‌اند. استفاده از روش‌های تصویربرداری در مقیاس نانومتری مانند FIB-SEM و همچنین نانوسی‌تی‌اسکن، می‌تواند به شناخت بیشتر از رفتار سنگ‌های متراکم بپردازد. از هوش مصنوعی در کاربردهای متعددی در مهندسی نفت از جمله در حوزه‌های، اکتشاف [۱ و ۲]، حفاری [۳]، مهندسی مخزن [۴-۶] و بهره‌برداری [۷] استفاده شده است. در مقیاس حفره، فنگ و همکاران برای فائق آمدن به کمبود داده‌های تصویری روشی بر مبنای شبکه عصبی cGAN ارائه کردند. در این روش برای به‌دست آوردن الگوی تصاویر ورودی و خروجی به‌جای استفاده از نوفه یا نویز در تولید کننده از قسمتی از تصویر واقعی به‌همراه یک نوفه اضافی– به‌منظور افزایش تنوع- استفاده شده است [۸]. فنگ و همکارانش بعدها روش خود در ساخت شبکه سه‌بعدی از تصاویر دو بعدی را با استفاده از شبکه عصبی BicycleGAN توسعه دادند [۹]. ولخونسکی و همکارانش با استفاده از شبکه عصبی GAN اقدام به بازیابی شبکه سه‌بعدی حفرات در اطراف قسمت مرکزی برش‌های دو بعدی سنگ متخلخل نمودند [۱۰]. ژاو و همکارانش برای ساخت مدل سه‌بعدی شبکه عصبی WGAN را گسترش دادند تا ابتدا توزیع داده‌های حاصل از تصاویر واقعی را بیاموزند. سپس با استفاده از تابع توزیع احتمال و تابع فاصله آغازین[2] به اصلاح تصاویر ساخته شده پرداختند [۱۱]. والسکی و همکاران یک شبکه عصبی DCGAN توسعه دادند که مستقیم با استفاده از تصاویر دو بعدی به ایجاد تصاویر سه‌بعدی می‌پردازد. اساس کار این شبکه آموزش شبکه تمییزدهنده بر مبنای تصاویر دو بعدی و آموزش شبکه مولد برای ساخت تصاویر سه‌بعدی است. آن‌ها برای اطمینان از نتیجه صحیح فرض کردند که اگر تصویری سه‌بعدی ایجاد شده خلاف واقع باشد به‌علت وجود حداقل یک تصویر دو بعدی غیرواقعی ایجاد شده است [۱۲].

موزر و همکاران استفاده از شبکه عصبی مولد رقابتی با داده‌های سه‌بعدی را به‌عنوان جایگزینی برای روش‌های تصادفی مرسوم در بازسازی شبکه منافذ پیشنهاد کردند [۱۳].

1. Digital Core Analysis
2. Inception Distance Function

آن‌ها در ادامه با گسترش شبکه توسعه داده شده خود موفق به بازسازی شبکه حفرات یک مدل سنگ آهکی با مقیاس بزرگتر بدون نیاز به تقسیم‌بندی فاز از روی داده‌های میکروسی‌تی‌اسکن شدند [۱۴]. ژنگ و همکاران در بررسی‌های خود به این نتیجه رسیدند در زمانی‌که داده‌های ورودی کم است می‌توان با اضافه کردن یک‌سری از داده‌ها به‌صورت دستی به شبکه عصبی cGAN دقت مدل را بالاتر برد [۱۵]. شمس و همکاران برای مدل‌سازی یک سنگ متراکم با تخلخل دوگانه از ترکیب شبکه عصبی GAN و شبکه عصبی خود رمزنگار[1] استفاده کردند. در این مدل، شبکه عصبی GAN وظیفه بازسازی محیط متخلخل بین دانه‌ای را دارد و شبکه عصبی خود رمزنگار به بازسازی محیط متخلخل درون دانه‌ای می‌پردازد [۱۶]. لیو و همکاران به مشاهده اثر پیش پردازش داده‌های یک محیط متخلخل همگن و ناهمگن در شبکه عصبی GAN پرداختند. آن‌ها دریافتند که عملیات‌های پیش‌پردازش باعث افزایش سرعت همگرایی مدل GAN می‌شود [۱۷]. در کار با داده‌های سه‌بعدی، محدودیت‌های سیستم همواره یکی از موانع کار محققان بوده است. کائو و همکارانش برای غلبه بر این مشکل از مدلی متشکل از دو شبکه عصبی InfoGAN و Style based GAN استفاده کرده‌اند که اصطلاحاً به آن CIS-GAN گفته می‌شود [۱۸]. ژائو و همکاران با استفاده از شبکه عصبی DCGAN اقدام به بازسازی شبکه حفرات یک ماسه سنگ متراکم کردند. آن‌ها با بررسی توزیع اندازه حفرات و تابع توزیع احتمال دریافتند که یک شبکه عصبی DCGAN در صورت آموزش صحیح نتایجی بسیار نزدیک به داده‌های ورودی ایجاد می‌نماید. نمونه‌های ساخته شده با یک مدل آموزش دیده ساختار حفراتی متفاوت از سنگ اصلی دارند اما توزیع تخلخل آن‌ها مشابه است [۱۹].

شبکه عصبی GAN علی‌رغم ظاهر ساده‌ای که دارد، پیچیدگی‌های فراوانی را در عمق خود پنهان کرده است. همچنین از ظهور و استفاده آن در بازسازی شبکه حفرات مدت زمان زیادی نمی‌گذرد. در این مطالعه، کارآیی یک شبکه عصبی DCGAN در بازسازی تصاویر سنگ مخزن متراکم، که در منابع کمتر به آن توجه شده است، استفاده شده است. پیش‌بینی خواص چنین نمونه‌هایی به‌علت تخلخل و تراوایی بسیار پایین به‌کمک روش‌های مستقیم اندازگیری خواص سنگ (آنالیز مغزه روتین و ویژه) بسیار دشوار است. با توجه به اندازه ریزحفرات سنگ مخزن متراکم (غالباً در ابعاد نانو)، از تصاویر سه‌بعدی حاصل از دستگاه FIB-SEM استفاده شده است. این روش تصویربرداری توانایی نمایش حفرات در ابعاد نانومتری را دارا است. به‌منظور صحت‌سنجی نتایج به‌دست آمده علاوه‌بر محاسبه تخلخل و تراوایی نمونه‌های ساخته شده و نمونه واقعی، تابع احتمال دونقطه‌ای و تابع مسیر خطی نمونه اصلی با نمونه‌های ساخته شده از شبکه عصبی مقایسه می‌شود.

روش کار

شبکه عصبی مولد رقابتی

برای نخستین بار گودفلو و همکارانش [۲۰] روش شبکه عصبی مولد رقابتی یا به اختصار GAN را معرفی کردند. این مدل رویه‌ای متفاوت از سایر الگوریتم‌های عصبی دارد و از دو شبکه عصبی به‌صورت همزمان استفاده می‌نماید. یک شبکه عصبی تمییزدهنده[2] و دیگری تولیدکننده[3] نامیده می‌شود. این دو شبکه به‌صورت همزمان فعالیت می‌کنند. هدف تولیدکننده ساخت خروجی مشابه با داده‌های ورودی است و هدف تمییزدهنده این است که مشخص کند آیا داده‌های وارد شده واقعی هستند یا دروغین. رقابت ایجاد شده بین دو شبکه باعث پیشرفت هر دوی آن‌ها می‌شود و خروجی کلی مدل نزدیک به داده‌های ورودی خواهد بود.

1. Auto Encoder (AE)
2. Discriminator
3. Generator

پژوهش نفت شماره ۱۲۶، آذر و دی ۱۴۰۱، صفحه ۹۴-۸۳

در این الگوریتم مدل سازنده بر مبنای رقابت پیوسته و هم‌زمان شبکه مولد (G) و تمییزدهنده (D) تخمین زده می‌شود. الگوریتم مولد توزیع داده‌ها را به‌دست می‌آورد و الگوریتم تمییزدهنده مشخص می‌کند که آیا داده‌های ورودی چه میزانی مشابه مدل واقعی هستند یا که توسط الگوریتم مولد ساخته شده‌اند. هدف این شبکه عصبی افزایش دقت الگوریتم مولد تا جایی است که شبکه تمییزدهنده دیگر قادر به تشخیص داده‌های ساختگی و واقعی نباشد. برای یادگیری توزیع مولد P_g بر داده‌های x یک نوفه اولیه بر داده‌های ورودی $P_z(z)$ تعریف می‌شود. سپس یک نگاشت به فضای داده‌ها به‌صورت $G(z;\theta_g)$ تعیین می‌شود که G یک تابع تمایز است که توسط یک پرسپترون[1] چندلایه با مقدار θ_g نمایش داده می‌شود. یک پرسپترون چندلایه دوم $D(x;\theta_d)$ نیز تعریف می‌شود که خروجی آن به‌صورت عددی[2] است. این الگوریتم آموزش می‌بینند تا احتمال تخصیص برچسب صحیح توسط تمییزدهنده بر روی داده‌های ورودی واقعی و داده‌های ساخته شده با مولد افزایش یابد. در همین حال، مولد آموزش می‌بینند تا مقدار $\log(1-D(G(z)))$ به کم‌ترین مقدار ممکن برسد. به بیان دیگر، مولد و تمییزدهنده بازی حداقل-حداکثر[3] دو نفره زیر را با تابع مقدار $V(G,D)$ انجام می‌دهند که با استفاده از مقدار چشم‌داشتی[4] E می‌توان رابطه را به‌صورت زیر نوشت [۲۰]:

$$\min_G \max_D V(D,G) = E_{x\sim P_{data}(x)}\left[\log D(x)\right] + E_{z\sim P_z(z)}\left[\log\left(1-D\left(G(z)\right)\right)\right] \quad (۱)$$

در این رابطه، z یک توزیع تصادفی به‌عنوان داده‌های ورودی به مولد است و $G(z)$ نمونه ساخته شده با استفاده از ورودی تصادفی به‌عنوان نوفه اولیه است. مولد به‌طور ضمنی توزیع احتمال P_g را به‌عنوان توزیع نمونه‌های $G(z)$ هنگامی که $z\sim P_z$ به‌دست می‌آید، تعریف می‌کند. در این روش، تلاش می‌شود تا الگوریتم به یک تخمین مناسب از P_{data} برسد. در این بازی حداقل- حداکثر، $P_g = P_{data}$ مقدار بهینه در نظر گرفته می‌شود. برای شبکه مولد ثابت مقدار بهینه تمییزدهنده $D_G^*(x)$ از طریق رابطه ۲ محاسبه می‌شود [۲۰].

$$D_G^*(x) = \frac{P_{data}(x)}{P_{data}(x)+P_g(x)} \quad (۲)$$

معیار آموزش تمییزدهنده با توجه به هر مولدی به حداکثر رساندن تابع مقدار $V(G,D)$ نمایش داده شده در رابطه ۳ است.

$$\begin{aligned} V(G,D) &= \int_x P_{data}(x)\log\left(D(x)\right)dx + \\ &\int_z P_z(z)\log\left(1-D\left(g(z)\right)\right) \\ &= \int_x P_{data}(x)\log\left(D(x)\right)+P_g(x)\log\left(1-D(x)\right)dx \end{aligned} \quad (۳)$$

بازی حداقل-حداکثر رابطه ۱ را اکنون می‌توان به‌صورت رابطه ۴ دوباره نویسی نمود.

$$\begin{aligned} C(G) &= \max_D V(G,D) \\ &= E_{x\sim P_{data}}\left[\log D_G^*(x)\right]+E_{z\sim P_z}\left[\log\left(1-D_G^*\left(G(z)\right)\right)\right] \\ &= E_{x\sim P_{data}}\left[\log D_G^*(x)\right]+E_{x\sim P_g}\left[\log\left(1-D_G^*(x)\right)\right] \\ &= E_{x\sim P_{data}}\left[\log\frac{P_{data}(x)}{P_{data}(x)+P_g(x)}\right]+E_{x\sim P_g}\left[\log\frac{P_g(x)}{P_{data}(x)+P_g(x)}\right] \end{aligned} \quad (۴)$$

مقدار حداقل تابع مقدار $C(G)$ تنها زمانی به‌دست می‌آید که $P_g = P_{data}$ باشد [۲۰].

تابع اتلاف [5]

بیشتر الگوریتم‌ها در یادگیری ماشین، برمبنای کمینه یا بیشینه‌سازی تابع هدف، عمل می‌کنند. گروهی از توابع هدف که قرار است کمینه شوند به توابع اتلاف معروف‌اند. البته به این توابع در مباحث هوش مصنوعی گاهی توابع هزینه[6] نیز می‌گویند. هدف از توابع اتلاف محاسبه مقداری است که یک مدل باید در طول آموزش به‌دنبال به حداقل رساندن آن باشد.

توابع اتلاف انواع مختلفی دارند در این پژوهش از دو تابع میانگین مربعات (MSE) و آنتروپی متقاطع دودویی[1] استفاده شده است [۲۱].

1. Perceptron
2. Scalar]
3. Minmax
4. Expected Value
5. Loss Function
6. Cost Function

بهینه‌ساز

بهینه‌سازها روش‌ها یا الگوریتم‌هایی هستند که برای تغییر ویژگی‌های شبکه عصبی مانند وزن و نرخ یادگیری[2] به‌منظور کاهش اتلاف به‌کار می‌روند. الگوریتم تخمین گشتاور تطبیقی یا Adam به‌عنوان یکی از پرکاربردترین الگوریتم‌های بهینه‌ساز در مدل‌سازی محیط متخلخل با استفاده از شبکه عصبی به‌کار رفته است. پیاده‌سازی این روش به سادگی قابل انجام است و از نظر محاسباتی کارآمد و به حافظه کمی نیاز دارد. در مواقعی که داده‌ها و یا پارامترها بزرگ هستند، از شبکه‌های عصبی عمیق استفاده می‌شود. همچنین در مواقعی که داده‌های ورودی پیچیدگی دارند یا که نوفه ورودی زیاد است این روش بهتر از سایر الگوریتم‌ها عمل می‌کند. همچنین در بهینه‌سازی شبکه‌های عصبی که ورودی آن‌ها داده‌های تصویری است نیاز به تنظیمات کمی دارد [۲۲]. مشخصات توابع اتلاف و تابع بهینه‌ساز به‌کار رفته در این پژوهش را می‌توان در جدول ۱ مشاهده کرد.

جدول ۱ مشخصات توابع اتلاف و بهینه‌ساز به‌کار رفته در شبکه عصبی مولد رقابتی

پارامتر	شبکه مولد	شبکه تمییزدهنده
تابع اتلاف	میانگین مربعات	آنتروپی متقاطع دودویی
بهینه‌ساز	Adam	Adam
نرخ یادگیری	$۱۰^{-۴}$	$۱۰^{-۵}$

ساختار شبکه عصبی به‌کار رفته

در این مطالعه از یک شبکه عصبی DCGAN متشکل از لایه‌های عصبی همگشتی استفاده شده است. به‌منظور طراحی معماری مناسب لایه‌ها از مدل ارائه شده شمس و همکاران [۱۶] و ژائو و همکاران [۱۹] الهام گرفته شده و مدل مناسب با شرایط سنگ متراکم مورد استفاده و داده‌های ورودی ساخته شده است. به این صورت که در شبکه عصبی مولد از ۶ لایه عصبی همگشتی برای ایجاد تصاویر استفاده می‌نماید. هر کدام از این لایه‌ها از یک تابع فعال‌ساز ReLU استفاده می‌نمایند و در آخرین لایه از تابع فعال‌ساز tanh استفاده شده است. به‌صورت تناوبی از لایه‌های Batchnormalization هم استفاده شده است. برای شبکه تمییزدهنده نیز از ۵ لایه عصبی همگشتی استفاده شده است. در انتهای هر لایه از یک تابع فعال‌ساز LeakyReLU استفاده شده است همچنین در لایه آخر برای تشخیص تصاویر واقعی از تصاویر ایجاد شده، از یک تابع فعال‌ساز sigmoid استفاده شده است. در شبکه عصبی تمییزدهنده تنها در لایه یکی مانده به آخر از لایه Batchnormalization استفاده شده است. در جدول ۲ ساختار شبکه عصبی به‌کار رفته آورده شده است. شماتیک ساختار شبکه عصبی مولد رقابتی به‌کار رفته در این پژوهش در شکل ۱ به نمایش در آمده است. با توجه به ساختار و فلسفه شبکه‌های عصبی برای بهره گرفتن از آن‌ها لازم است از سیستم‌های رایانه‌ای مجهز به پردازنده گرافیکی استفاده بشود در غیر این صورت زمان اجرا بسیار طولانی خواهد بود. مشخصات سیستم رایانه‌ای مورد استفاده را می‌توان در جدول ۳ مشاهده کرد.

تابع احتمال دو نقطه‌ای

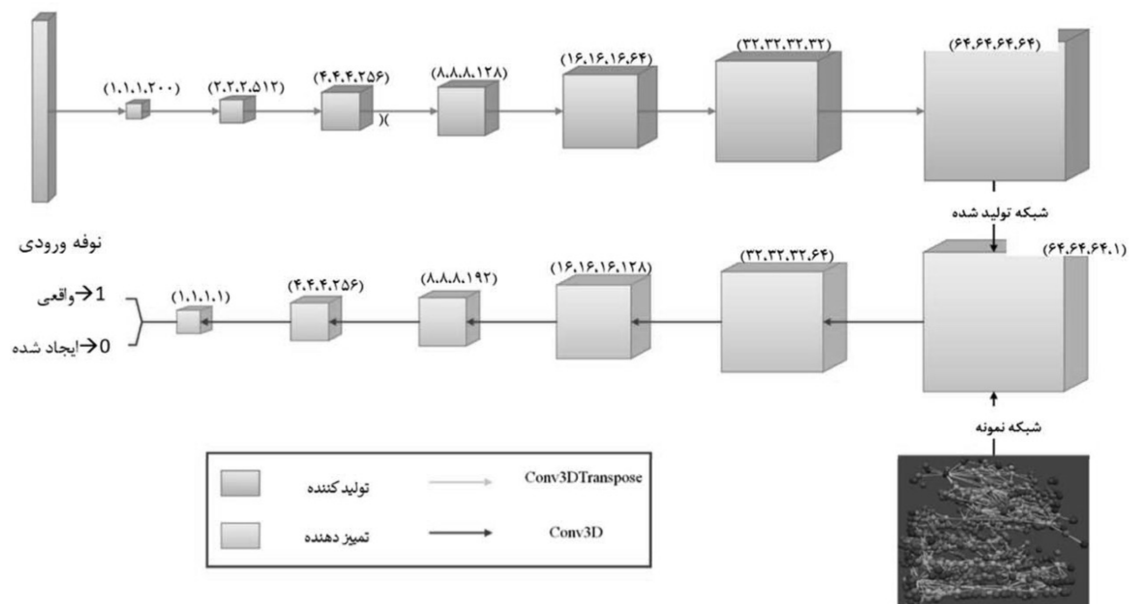
برای بررسی کیفیت ریزساختارهای ایجاد شده با استفاده از شبکه عصبی مولد رقابتی با شرط ایستایی تصاویر ایجاد شده یکی از روش‌های مورد استفاده تابع احتمال دو نقطه‌ای است. با استفاده از این تابع می‌توان ساختار مرتبه دوم محیط متخلخل در فاز حفره را مشخص کرد. با فرض ثابت بودن، این تابع معادل کوواریانس بدون مرکز[3] است [۱۳].

$$S_2(r)=P(x\in p, x+r\in p) \quad for \quad x, r\in\mathbb{R}^d \qquad (۵)$$

1. Binary Cross-Entropy
2. Learning Rate
3. Uncentered Covariance

جدول ۲ ساختار شبکه عصبی مولد و تمییزدهنده

لایه	مدل	فیلتر	کرنل یا هسته	شیفت	نرمال‌سازی بچ	فعال‌ساز
شبکه مولد						
۱	Conv3DTranspose	۵۱۲	۴*۴*۴	۲	بله	ReLU
۲	Conv3DTranspose	۲۵۶	۴*۴*۴	۲	خیر	ReLU
۳	Conv3DTranspose	۱۲۸	۴*۴*۴	۲	بله	ReLU
۴	Conv3DTranspose	۶۴	۴*۴*۴	۲	خیر	ReLU
۵	Conv3DTranspose	۳۲	۴*۴*۴	۲	بله	ReLU
۶	Conv3DTranspose	۱	۴*۴*۴	۲	خیر	tanh
شبکه تمییزدهنده						
۱	Conv3D	۶۴	۴*۴*۴	۲	خیر	LeakyReLU
۲	Conv3D	۱۲۸	۴*۴*۴	۲	خیر	LeakyReLU
۳	Conv3D	۱۹۲	۴*۴*۴	۲	خیر	LeakyReLU
۴	Conv3D	۲۵۶	۴*۴*۴	۲	بله	LeakyReLU
۵	Conv3D	۱	۴*۴*۴	۲	خیر	sigmoid



شکل ۱ شماتیک شبکه عصبی مولد رقابتی به‌کار رفته

جدول ۳ مشخصات سیستم رایانه‌ای مورد استفاده

پردازنده	مدل	تعداد هسته	سرعت پایه	نرخ کلاک	حافظه موقت
پردازنده مرکزی	Intel(r) xeon(r) gold 6140	۳۶	۲۳۰۰ MHz	۳۷۰۰ MHz	۳۷۷ GB
پردازنده گرافیکی	NVIDIA Tesla V100 PCIe	۵۱۲۰ CUDA	۱۲۴۵ MHz	۱۳۸۰ MHz	۳۲ GB

P احتمال بین دو نقطه x و x+r است که با بردار تأخیر r از یکدیگر جدا شده‌اند. دو نقطه با فاصله r هر دو در فاز حفره (p) قرار دارند. هرچند که $S_2(r)$ را می‌توان برای هر دو فاز سنگ یا حفره در فضای متخلخل تعریف کرد که $S_2(0)$ بیانگر تخلخل محیط متخلخل است [۱۱].

تابع مسیر خطی

یکی دیگر از روش‌هایی که در بررسی دقت ریزساختارهای ساخته شده به‌کار می‌رود تابع مسیر خطی است. این تابع اتصال منافذ را با محاسبه احتمال این که خط l_r به طول r به‌طور کامل در فضای خالی باشد، بررسی می‌کنند [۱۵]. این تابع به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$L(r) = prob\{I(u)=1, I(u+1)=1, ..., I(u+r)=1\} \quad (۶)$$

در این تابع، u مبدأ خط l_r، I(u) یک نشانگر و $I(u+1)=1$ تمام نقاط خط، در فضای حفره است [۱۵]. شماتیک توابع احتمال دو نقطه‌ای و مسیر خطی را می‌توان در شکل ۲ مشاهده کرد.



شکل ۲ توابع احتمال دو نقطه‌ای و مسیر خطی [۲۳]

نحوه محاسبه تخلخل و تراوایی

برای محاسبه تخلخل حجم فضاهای خالی محاسبه می‌شود و با تقسیم حجم کل فضای حفرات به حجم کل نمونه تخلخل محاسبه می‌گردد.

$$\varphi = \sum V_p / L_x \times L_y \times L_z \quad (۷)$$

به‌منظور محاسبه تراوایی مطلق شبکه جریان در سه جهت برقرار و از معادلات جریان استوکس در محاسبه دبی جریان استفاده می‌شود. در جریان استوکس نیروی غالب جریان از نوع نیروهای ویسکوز است که عدد رینولدز آن کوچکتر از یک است. از آن جایی که نیروهای ویسکوز نیروی غالب در این جریان است از نیروهای داخلی صرف نظر می‌شود در نتیجه با حذف پارامترهای تعادل انرژی جنبشی در رابطه ناویر-استوکس تعادل جنبشی به‌صورت زیر حاصل می‌شود:

$$\nabla \cdot P + f = 0 \quad (۸)$$

در رابطه بالا، P نشان‌دهنده فشارهای وارده و f نیروهای وارد بر سطح را نشان می‌دهد. هدایت هیدرولیکی که به‌عنوان ضریب تراوایی شناخته شده است بین دو حفره i و j با استفاده از رابطه هیگن-پوالسه به‌صورت زیر قابل محاسبه است:

$$g_{H.i\text{-}j} = g_{H.t} = \pi/128\,(D_t^4)/L_t \quad (۹)$$

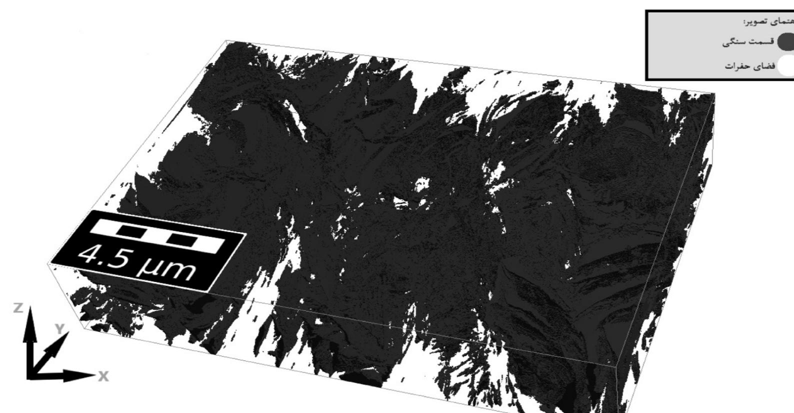
در این رابطه، D_t حجم و L_t طول گلوگاه را نشان می‌دهند. برای محاسبه جریان بین دو حفره رابطه زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد:

$$q_{i\text{-}j} = \pi/128_\mu\,(D_t^4)/L_t)(P_j - P_i) = g_{H.t}\Delta P_{i\text{-}j} \quad (۱۰)$$

μ نشانگر ویسکوزیته و P فشار حفره را نشان می‌دهد. سپس با استفاده از رابطه دارسی، تراوایی‌ها در سه جهت محاسبه و میانگین آن‌ها به‌عنوان تراوایی کل محاسبه می‌گردد [۲۴].

تصویربرداری

برای تصویربرداری از نمونه سنگ از دستگاه FIB-SEM استفاده شده است. روش کار دستگاه FIB-SEM به این صورت است که ابتدا با استفاده از میکروسکوپ الکترونی از نمونه عکس گرفته می‌شود. سپس با بمباران نمونه به وسیله‌ی یون‌ها لایه‌ای از روی سطح نمونه برداشته می‌شود و این روند تکرار می‌شود تا یک‌سری تصویر دو بعدی پشت سر هم به‌دست آید که با اتصال آن‌ها به یکدیگر می‌توان یک تصویر سه‌بعدی از نمونه ایجاد کرد. برای انجام این کار از زبان برنامه نویسی پایتون و نرم افزار پردازش تصویر ImageJ استفاده می‌شود. تصویر سه‌بعدی به‌دست آمده از این دستگاه را در شکل ۳ می‌توان مشاهده نمود.



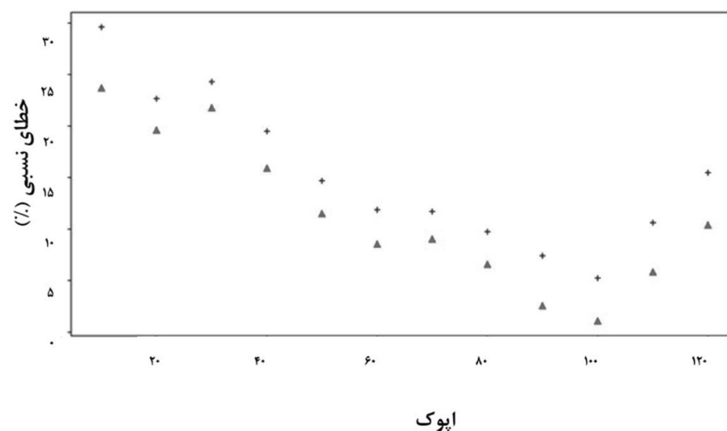
شکل ۳ تصویر سه‌بعدی FIB-SEM از نمونه

وضوح واکسل‌های این تصویر برابر با ۱۲/۵ nm و اندازه کلی تصویر ۱۸ در ۱۳ در ۳/۷۵ µm است. لازم به ذکر است تصویر مورد استفاده از مؤسسه زمین‌شناسی دانشگاه ماینتس آلمان گرفته شده است [۲۵].

نتایج و بحث

شبکه‌های عصبی به‌جای حل مسائل با راه‌حل‌های مشخص، تلاش می‌کنند تا ارتباط داده‌های ورودی و خروجی را با استفاده از الگوریتم‌های تعریف شده، به‌دست آورند. در نتیجه، اطلاعات ورودی نقش مهمی در دقت این روش‌ها دارند. به‌منظور آماده‌سازی اطلاعات ورودی محتوای خام به‌دست آمده از FIB-SEM با استفاده از نرم‌افزار ImageJ به فایل باینری[1] تبدیل می‌شود. از آن‌جایی‌که نوفه بسیار کمی در این تصاویر وجود داشت، تصاویر به‌صورت مستقیم به مرحله تقسیم فاز- جدایش فاز حفره و سنگ- رفتند و از روش‌های پالایش نوفه استفاده نشد. با تقسیم تصویر اصلی به قطعات کوچکتر تعداد ۳۷۸۰ تصویر سه‌بعدی در ابعاد ۶۴×۶۴×۶۴ به‌عنوان ورودی شبکه عصبی مولد رقابتی آماده‌سازی می‌شود. پس از بررسی نتایج به‌دست آمده از شبکه عصبی مشخص گردید بهترین و دقیق‌ترین نتایج در این شبکه ۱۰۰ بار آموزش شبکه یا ۲۰۰۰ تکرار حاصل می‌شود. در هر بار آموزش شبکه، کل داده‌ها از الگوریتم گذرانده می‌شود و هر تکرار برابر با عبور قسمتی از داده‌ها از شبکه است. تقسیم داده‌ها به قسمت‌های کوچکتر به‌منظور مدیریت حافظه و کنترل بیشتر برروی یادگیری انجام می‌شود. برای انتخاب بهترین تعداد تکرار در ابتدا ۲۰۰ نمونه کاملاً تصادفی از داده‌های ورودی انتخاب و تخلخل و تراوایی میانگین این نمونه‌ها محاسبه می‌شود. پس از هر ده بار آموزش شبکه، ۲۰۰ نمونه تصادفی از شبکه حفرات ساخته می‌شود و تخلخل و تراوایی میانگین آن‌ها محاسبه می‌گردد. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، کمترین میزان خطا در ۱۰۰ تکرار به‌دست می‌آید. در شکل ۵ می‌توان یک برش دو بعدی از یک تصویر ساخته شده با شبکه عصبی را در مقایسه با برش دو بعدی یک تصویر ورودی از نمونه واقعی را مشاهده کرد. در این شکل می‌توان از لحاظ کیفی و بصری تصاویر را با یکدیگر مقایسه کرد و می‌توان تشابه الگوی حفرات در تصویر ساخته شده در مقایسه با نمونه اصلی مشاهده نمود. پس از آموزش شبکه عصبی می‌توان شبکه آموزش دیده را ذخیره کرد و هر زمان که نیاز به ساخت تصاویری منطبق بر داده‌های ورودی بود دوباره آن را بازخوانی کرد. به‌منظور مقایسه داده‌های واقعی و شبکه ساخته شده دو تا از مهم‌ترین خواص پتروفیزیکی سنگ که تخلخل و تراوایی می‌باشند ، برای نمونه‌های ساخته شده و نمونه‌های برداشته شده از تصویر واقعی سنگ مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

1. Binary



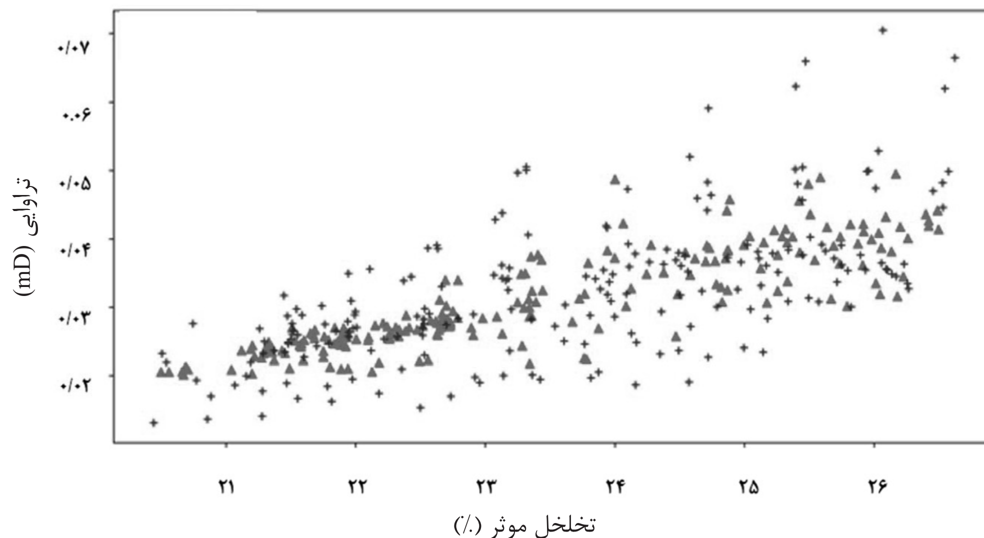
شکل ۴ خطای نسبی تخلخل (▲) و تراوایی (+) شبکه‌های ساخته شده با مدل DCGAN برحسب تعداد تکرار



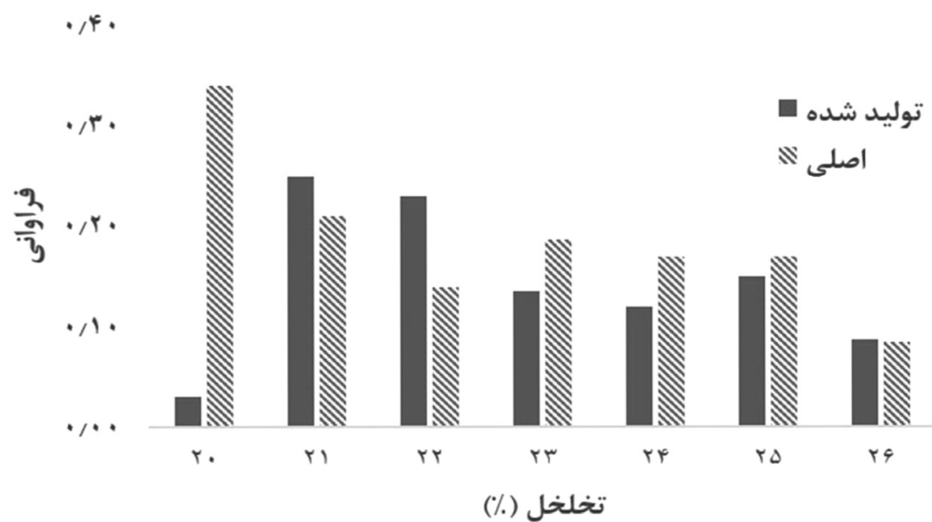
شکل ۵ برش دو بعدی از ریزساختارها: الف) تصویر واقعی گرفته شده با FIB-SEM و ب) تصویر ساخته شده با شبکه عصبی DCGAN

برای مقایسه نمونه‌های ساخته شده با نمونه اصلی، تعداد ۲۰۰ عدد نمونه به‌صورت اتفاقی از هرکدام از داده‌های واقعی و تولید شده انتخاب شده است. نمودار تراوایی و تخلخل این نمونه‌ها در شکل ۶ به نمایش در آمده است. با دقت در نمودار بالا مشخص است که تجمع شبکه‌های ساخته شده مایل به نقاطی است که پراکندگی داده‌ها در آن منطقه بیشتر است. این تجمع براساس خواص ذاتی آموزش شبکه‌های عصبی است که وزن شبکه بیشتر متمایل به مناطقی است که تجمع داده‌ها در آن نقاط بیشتر از سایرین است. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود شبکه‌های ساخته شده در اطراف نقاطی که تجمع داده‌های ورودی بیشتر بوده است حضور پر رنگ‌تری دارند. در شکل ۸ نمودار جعبه‌ای تخلخل و تراوایی ۲۰۰ نمونه واقعی در مقابل ۲۰۰ نمونه ساخته شده با مدل مشاهده می‌شود. همان‌طور که در این نمودارها دیده می‌شود تطابق خوبی بین نمونه‌های ساخته شده با داده‌های واقعی برقرار است. دو تابع اتصال دو نقطه‌ای و مسیر خطی نیز دید خوبی از دقت نمونه‌های ساخته شده با شبکه عصبی GAN به ما می‌دهند.

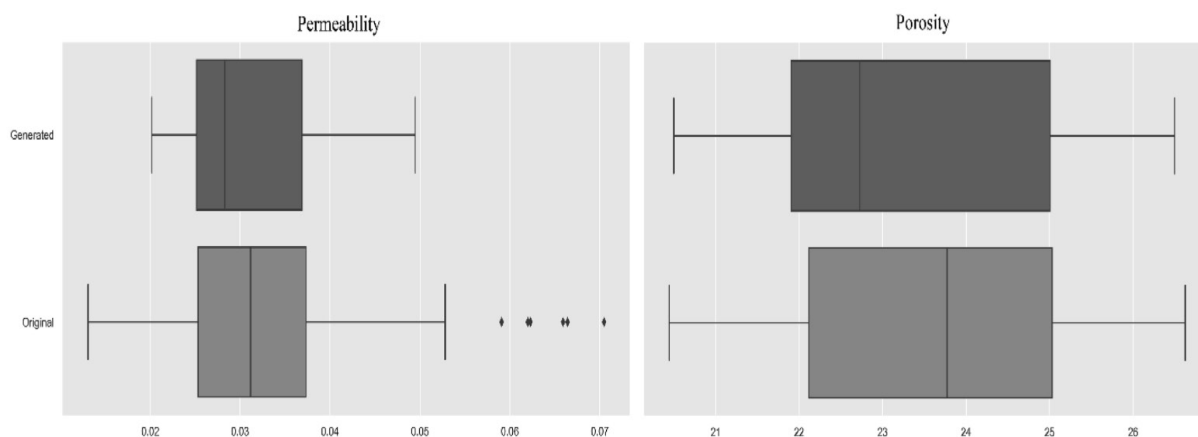
در نمودارهای شکل ۹ تعداد ۵۰ نمونه از شبکه‌های ساخته شده انتخاب و مقدار میانگین آن‌ها در مقایسه با داده‌های واقعی محاسبه شده از سنگ آورده شده است.



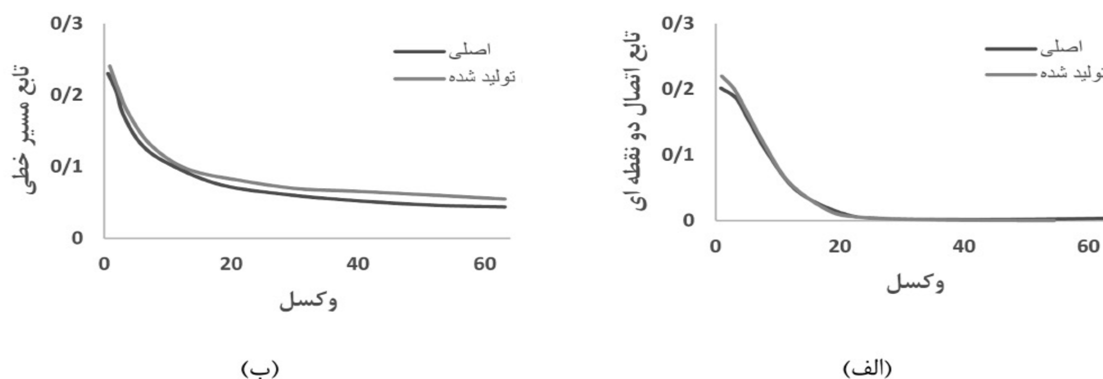
شکل ۶ مقایسه بین تخلخل و تراوایی نمونه‌های جدا شده از سنگ واقعی (+) در مقابل نمونه‌های ساخته شده (▲) با شبکه عصبی



شکل ۷ نمودار توزیع میله‌ای درصد فراوانی برحسب تخلخل



شکل ۸ نمودار جعبه‌ای تخلخل و تراوایی ۲۰۰ نمونه حقیقی و ساخته شده با شبکه عصبی



(الف) (ب)

شـکل ۹ الـف) توابـع فاصلـه دو نقطـه‌ای و ب) مسـیر خطـی نمونـه سـنگ در مقابـل میانگیـن ۵۰ شـبکه سـاخته شـده بـا الگوریتـم DCGAN

نتیجه‌گیری

در ایـن پژوهـش از یـک شـبکه عصبـی DCGAN بـرای بازسـازی شـبکه حفـرات یـک نمونـه سـنگ متراکـم اسـتفاده شـد. همان‌طـور کـه در نتایـج نشـان داده شـد نمونه‌هـای سـاخته شـده بـا شـبکه عصبـی آمـوزش داده شـده تخلخـل و تراوایـی منطبـق بـا نمونه‌هـای واقعـی داشـتند و از طرفـی نمودارهـای تابـع احتمـال دو نقطـه‌ای و تابـع مسـیر خطـی نیـز مهـر تاییـد دیگری بـر دقـت شـبکه توسـعه داده شـده می‌باشـند. کل زمـان مـورد نیـاز بـرای آمـوزش ایـن شـبکه عصبـی نزدیـک بـه یـک سـاعت بـوده اسـت کـه در مقایسـه بـا سـایر روش‌هـا ماننـد MPS بسـیار سـریعتر محسـوب می‌شـود و از طرفـی تنهـا بـا یکبـار آمـوزش می‌تـوان بـه دفعـات در کسـری از ثانیـه شـبکه‌های جدیـدی ایجـاد کـرد. نشـان داده شـد در صـورت پیکربنـدی مناسـب ایـن شـبکه عصبـی توانایـی ایجـاد خروجی‌هایـی منطبـق بـا داده‌هـای ورودی حتـی درصورتی‌کـه در تعـداد داده‌هـای ورودی محدودیـت وجـو داشـته باشـد را دارا اسـت.

مراجع

[1]. Seyedali S R, Alizadeh B, Zahmatkesh I, Sarafdokht H (2022) Estimation of total organic carbon content and kerogen type from well log data by combining artificial neural network and metaheuristic algorithms, Journal of Petroleum Research, 32, 1401-3: 112-130.
[2]. Tofighi F, Armani P, Chehrazi A, Alimoradi A (2021) Comparison of the function of conventional neural networks for estimating porosity in one of the southeastern iranian oil fields, Journal of Petroleum Research, 31, 400-3: 90-105.
[3]. Moazzeni A, Khamehchi E (2019) Drilling rate optimization by automatic lithology prediction using hybrid machine learning, Journal of Petroleum Science and Technology, 9, 4: 77-88.
[4]. Alipour Shahsavari M, Memarian H, Tokhmchi B, Sadigh S (2017) Reservoir rock type identification using gustafson kessel algorithm and LOLIMOT estimator, Journal of Petroleum Research, 26, 95-5: 184-196.
[5]. Kadkhodaie A (2022) Reservoir quality evaluation based on integration of artificial intelligence and NMR-derived electrofacies, Journal of Petroleum Science and Technology.
[6]. Khoshbakht F, Mohammadnia M, RahimiBahar A A, Beiraghdar Y (2015) Evaluating different approaches to permeability prediction in a carbonate reservoir, Journal of Petroleum Science and Technology, 5, 1: 79-90.
[7]. Mirzaie Harsini F A, NazariSaram M (2022) Nonlinear model predictive controller for electrical submersible pump lifted wells, Journal of Petroleum Research.
[8]. Feng J, He X, Teng Q, Ren C, Chen H, Li Y (2019) Reconstruction of porous media from extremely limited information using conditional generative adversarial networks, Physical Review E, 100, 3: 033308.
[9]. Feng J, Teng Q, Li B, He X, Chen H, Li Y (2020) An end-to-end three-dimensional reconstruction framework of porous media from a single two-dimensional image based on deep learning, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 368: 113043.
[10]. Volkhonskiy D, Muravleva E, Sudakov O, Orlov D, Belozerov B, Burnaev E, Koroteev D (2019) Reconstruction of 3d porous media from 2d slices, arXiv preprint arXiv:1901.10233.

[11]. Zha W, Li X, Xing Y, He L, Li D (2020) Reconstruction of shale image based on Wasserstein Generative Adversarial Networks with gradient penalty, Advances in Geo-Energy Research, 4, 1: 107-114.
[12]. Valsecchi A, Damas S, Tubilleja C, Arechalde J (2020) Stochastic reconstruction of 3D porous media from 2D images using generative adversarial networks, Neurocomputing, 399: 227-236.
[13]. Mosser L, Dubrule O, Blunt M J (2017) Reconstruction of three-dimensional porous media using generative adversarial neural networks, Physical Review E, 96, 4: 043309.
[14]. Mosser L, Dubrule O, Blunt M J (2018) Stochastic reconstruction of an oolitic limestone by generative adversarial networks, Transport in Porous Media, 125, 1: 81-103.
[15]. Zheng Q, Zhang D (2022) Digital rock reconstruction with user-defined properties using conditional generative adversarial networks, Transport in Porous Media, 1-27.
[16]. Shams R, Masihi M, Boozarjomehry R B, Blunt M J (2020) Coupled generative adversarial and auto-encoder neural networks to reconstruct three-dimensional multi-scale porous media, Journal of Petroleum Science and Engineering, 186: 106794.
[17]. Liu S, Zhong Z, Takbiri-Borujeni A, Kazemi M, Fu Q, Yang Y (2019) A case study on homogeneous and heterogeneous reservoir porous media reconstruction by using generative adversarial networks, Energy Procedia, 158: 6164-6169.
[18]. Cao D, Hou Z, Liu Q, Fu F (2022) Reconstruction of three-dimension digital rock guided by prior information with a combination of InfoGAN and style-based GAN, Journal of Petroleum Science and Engineering, 208, 109590.
[19]. Zhao J, Wang F, Cai J (2021) 3D tight sandstone digital rock reconstruction with deep learning, Journal of Petroleum Science and Engineering, 207, 109020.
[20]. Goodfellow I, Pouget-Abadie J, Mirza M, Xu B, Warde-Farley D, Ozair S, Courville A, Bengio Y (2014) Generative adversarial nets, Advances in Neural Information Processing Systems, Proceedings of the 27th International Conference on Neural Information Processing Systems, 2, 2672–2680.
[21]. Müter D, Sørensen H, Jha D, Harti R, Dalby K, Suhonen H, Feidenhans›l R, Engstrøm F, Stipp S (2014) Resolution dependence of petrophysical parameters derived from X-ray tomography of chalk, Applied Physics Letters, 105, 4: 043108.
[22]. Kingma D P, Ba J (2014) Adam: A method for stochastic optimization, arXiv preprint arXiv:1412.6980.
[23]. Zhang F, He X, Teng Q, Wu X, Dong X (2022) 3D-PMRNN: Reconstructing three-dimensional porous media from the two-dimensional image with recurrent neural network, Journal of Petroleum Science and Engineering, 208: 109652.
[24]. Gostick J T (2017) Versatile and efficient pore network extraction method using marker-based watershed segmentation, Physical Review E, 96, 2: 023307.
[25]. Jacob A, Peltz M, Hale S, Enzmann F, Moravcova O, Warr L N, Grathoff G, Blum P, Kersten M (2021) Simulating permeability reduction by clay mineral nanopores in a tight sandstone by combining computer X-ray microtomography and focussed ion beam scanning electron microscopy imaging, Solid Earth, 12, 1: 1-14.

شبیه‌سازی عددی جریان دوفازی نفت- دی اکسید کربن در مقیاس منفذ ناحیه نزدیک-امتزاج‌پذیری با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی

پریسا بهنود[1]، محمدرضا خرسند موقّر[1]* و مصطفی کشاورز مروجی[2]
۱- دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، ایران
۲- دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۱۹

چکیده

سیلاب‌زنی از طریق تزریق گاز دی‌اکسیدکربن مدت‌های مدیدی است که به‌عنوان یک روش رایج به‌منظور بهبود بازیابی نفت، کاهش اثر گلخانه‌ای گاز دی‌اکسیدکربن، ذخیره‌سازی دی‌اکسیدکربن بکار میرود. تزریق گاز به‌صورت امتزاج‌پذیر همواره به‌عنوان کارآمدترین روش جهت افزایش ضریب بازیافت مطرح بوده است. ولیکن شرایط مخازن همواره به گونه‌ای نیست که فشار مخزن بالاتر از فشار امتزاج‌پذیری باشد؛ بلکه به‌دلیل مشکلات ناشی از حفظ و نگهداری فشار مخزن در محدوده موردنظر، اغلب مخازن که تحت عملیات تزریق گاز امتزاج‌پذیر بوده‌اند، مقادیر فشاری کمتر از فشار کمینه امتزاجی را تجربه می‌نمایند. لذا در این موقعیت، فرآیند تزریق تحت شرایط نزدیک- امتزاج‌پذیر از لحاظ عملیاتی امکان‌پذیرتر است. هدف از این مطالعه بررسی رفتار جریانی نفت- دی‌اکسیدکربن در مقیاس- منفذ در فرآیند تزریق گاز نزدیک- امتزاج‌پذیر در یک محیط متخلخل ناهمگن است. از این‌رو ابتدا ناحیه فشاری نزدیک- امتزاج‌پذیری مؤثر براساس معیارهای موجود محاسبه و تعیین می‌گردد. سپس شبیه‌سازی عددی در مقیاس- منفذ در حد پایینی ناحیه فشاری مورد نظر (کمینه فشار ناحیه برابر با ۰/۸۷ حداقل فشار امتزاج‌پذیری)، با بهره‌گیری از ماژول میدان فازی در ترکیب با روابط ناویراستوکس با اتخاذ خواص سطحی نفوذی و خواص هیدرودینامیک سیالات در نرم‌افزار کامسول صورت می‌پذیرد. بررسی کمی نتایج حاصل از این مطالعه به‌منظور درک بهتر از مکانیسم بازیافت نفت در مقیاس-منفذ نشان می‌دهد چنانچه شرایط فشاری در سرتاسر مدل‌سازی در ناحیه فشاری نزدیک- امتزاج‌پذیری مؤثر حفظ گردد، ضریب بازیافت نفت از حدود ۵۰٪ به بیش از ۹۰٪ ارتقاء می‌یابد که این میزان بازیافت به مقادیر مربوط به فرآیند تزریق گاز امتزاجی نزدیک است.

کلمات کلیدی: ذخیره‌سازی دی اکسید کربن، مدل مقیاس- منفذ، ناحیه نزدیک- امتزاج‌پذیری، ازدیاد برداشت نفت، میدان فازی

*مسؤول مکاتبات
آدرس الکترونیکی m.khorsand@aut.ac.ir
شناسه دیجیتال: (DOI:10.22078/PR.2022.4973.3217)

پژوهش نفت شماره ۱۲۶، آذر و دی ۱۴۰۱، صفحه ۱۰۹-۹۵

مقدمه

سیلاب‌زنی گاز دی اکسید کربن مدت‌هاست که به‌عنوان روش مطلوبی برای بهبود بازیافت نفت در قالب روش ازدیاد برداشت[1] مطرح است و به‌منظور بهینه‌سازی سیستم‌های تزریق گاز در نظر گرفته می‌شود [۱-۷]. درحالی‌که ازدیاد برداشت مبتنی بر گاز دی اکسید کربن با کاهش ویسکوزیته نفت و تحرک‌پذیری دی اکسید کربن می‌تواند بازیابی نفت را بهبود بخشد، برای کاهش انتشار گاز و ذخیره‌سازی کربن[2] و کارهای مربوط به جداسازی گاز دی اکسید کربن نیز از اهمیت بالایی برخوردار است [۸-۱۰]. برای بهینه‌سازی و ارزیابی فرآیند تزریق گاز کربن دی اکسید، درک رفتار جریان نفت-کربن دی اکسید در محیط متخلخل بسیار ضروری است. در مقالات مختلف، بحث‌های زیادی پیرامون تاثیر امیدوارکننده میزان حلالیت و شرایط نزدیک به امتزاج‌پذیری در طول سیلاب‌زنی گاز دی اکسید کربن دیده می‌شود [۱۱-۱۳]. با این حال، سیلاب کاملا امتزاج‌پذیر از نظر شرایط اقتصادی و عملیاتی به‌عنوان یک رویکرد پرهزینه و دشوار در نظر گرفته می‌شود که ناشی از هزینه بالای تزریق گاز غنی و رسیدن به شرایط تزریق فشار بالا است. به این ترتیب، روش سیلاب نزدیک- امتزاج‌پذیری کربن دی اکسید به‌عنوان یک روش جایگزین و امکان‌پذیرتر در نظر گرفته می‌شود [۱۴-۱۶]. تزریق گاز نزدیک- امتزاج‌پذیری شامل تزریق گازهایی است که امتزاج‌پذیری کاملی با نفت ندارند ولی تقریبا به آن نزدیک هستند [۱۷]. بیو و همکارانش نشان دادند که هنگام استخراج نفت در شرایط نزدیک به امتزاج‌پذیری، تنها مکانیزم موجود، انتقال جرم بین اجزای نفت و دی اکسید کربن نمی‌باشد بلکه که کاهش ویسکوزیته در فاز نفتی به‌دلیل انحلال گاز در این فاز نیز نقش قابل توجهی برای عامل بازیابی مکانیزم استخراج دارد [۱۸]. چندین پژوهش نیز در این مقالات برای پیش‌بینی یک ناحیه فشاری معقول به‌منظور احراز شرایط نزدیک- امتزاج‌پذیری دیده می‌شود [۱۹-۲۱]. به تازگی، چن و همکارانش برخی از روابط تجربی را برای پیش‌بینی حداقل فشار امتزاج‌پذیری و محدوده فشاری نزدیک- امتزاج‌پذیر موثر برای پروژه‌های تزریق دی اکسید کربن خالص و ناخالص پیش‌بینی کردند که در هر مخزن و با توجه به شرایط خاص آن قابل استفاده است. براین‌اساس ناحیه فشاری نزدیک- امتزاج‌پذیری مؤثر مابین ۰/۸۷ حداقل فشار امتزاج‌پذیری و ۱/۰۷ حداقل فشار امتزاج‌پذیری است. لذا این تحقیق یک ابزار کاربردی برای مشخصه‌سازی ناحیه نزدیک- امتزاج‌پذیر و طراحی فرآیندهای آتی سیلاب‌زنی نزدیک- امتزاج‌پذیری دی اکسید کربن فراهم کرده است [۲۲]. تا همین اواخر، بیشتر تحقیقات ارائه شده معمولا برروی جابه‌جایی نفت- دی اکسید کربن در مقیاس مغزه و میدان تمرکز یافته‌اند هرچند که مطالعاتی محدود نیز در زمینه بررسی رفتار پیچیده جابه‌جایی نفت– دی اکسید کربن در مقیاس منفذ صورت پذیرفته است. مطالعات در مقیاس منفذ رویکردهای مستحکمی برای تجسم مکانیزم های جابه‌جایی سیالات، مشخص کردن برهم‌کنش‌های سیال– سیال و سیال– سنگ و تجزیه و تحلیل پروفایل‌های توزیع سیالات با توجه به تاثیر نیرو در مقیاس میکرو در نظر گرفته می‌شوند [۲۳-۲۷]. سیدی و همکارانش، جریان چند فازی سیستم نفت– آب– دی اکسید کربن در مدل میکرو سیال با فشار زیاد در حالت نزدیک- امتزاج‌پذیری بررسی کردند. آنها نشان دادند که با وجود راندمان کم جابه‌جایی دی اکسید کربن-نفت در مراحل اولیه تزریق به‌واسطه تحرک‌پذیری بالای گاز تزریقی، نفوذ دی اکسید کربن در فاز نفت می‌تواند باعث بروز جریان موئینگی متقاطع[3] در سراسر نفت به دام افتاده/ نفت کنارگذر[4] شود و ضریب بازیابی پس از زمان میان‌شکنی را بهبود بخشد.

1. Enhanced Oil Recovery
2. Carbon Sequestration
3. Capillary Cross Flow
4. By-passed Oil/ Trapped Oil

نتایجی که به‌دست آوردند میزان اهمیت نفوذ دی اکسید کربن در سیلاب‌های نزدیک- امتزاج‌پذیری را نشان می‌دهد [۲۸]. ژو و همکارانش درباره روند تخلیه سیستم نفت- دی اکسید کربن در یک محیط متخلخل نفت دوست مطالعه کردند که در مطالعه خود از روش ارتباط بین سطحی میدان فازی[1] استفاده کردند. با اجرای یک آنالیز حساسیت گسترده روی عدد گرانش، عدد موئینگی و نسبت‌های ویسکوزیته، آنها نشان دادند که نیروی ویسکوز در طول فرآیند ازدیاد برداشت از طریق تزریق دی اکسید کربن مکانیزم غالب بوده است و اگر نیروی ویسکوز اندک باشد، زبانه‌های گرانش[2] میزان بهره وری جابه‌جایی کربن دی اکسید- نفت را بهبود می‌بخشند. علاوه‌براین، آنها نشان دادند که بعد از میان شکنی دی اکسید کربن، فشار مسیر اصلی جریان گاز به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد و فاز نفت دوباره در حفره‌های بزرگی که از قبل توسط دی اکسید کربن اشغال شده بود، جریان می‌یابد [۲۹].

ما و همکارانش با استفاده از رویکردهای مختلف، یک مطالعه عددی برروی سیلاب‌زنی امتزاج‌پذیر، غیرقابل امتزاج‌پذیر و نزدیک- امتزاج‌پذیر اجرا کردند. نتایج آنها نشان می‌دهد درحالی‌که سیلاب‌زنی نزدیک- امتزاج‌پذیر از نظر بهره‌وری جاروبی نسبت به سیلاب‌زنی غیرقابل امتزاج‌پذیر محبوبیت بیشتری دارد، اما قادر به جابه‌جایی نفت در گلوگاه‌های منافذ کوچک‌تر نیست. همچنین آن‌ها اظهار داشتند که میزان تاثیر ضریب نفوذ دی اکسید کربن حین سیلاب‌زنی امتزاج‌پذیر قابل اغماض است و فرض بر این بوده که کشش سطحی در کل شبیه‌سازی‌ها ثابت بوده است [۳۰].

در مطالعه کنونی، بررسی و شناخت مکانیسم جابه‌جایی نفت (دکان) در فرآیند سیلاب‌زنی گاز دی اکسید کربن در مقیاس منفذ با تمرکز بر ناحیه فشاری موثر نزدیک- امتزاج‌پذیر صورت می‌پذیرد، ناحیه‌ای که از نظر اقتصادی به‌صرفه‌تر و از نظر عملیاتی امکان‌پذیرتر است. لذا پس از تعیین محدوده فشاری موثر نزدیک- امتزاج‌پذیر، فشار تزریق گاز متناظر با حد پایینی محدوده فشاری موثر نزدیک- امتزاج‌پذیر تنظیم می‌گردد. با اتخاذ این فرض، کشش سطحی بین نفت و دی اکسید کربن به مقادیر بسیار پایین ولیکن مخالف با صفر میل می‌نماید. از این رو کشش سطحی پویا به‌منظور مدل‌سازی واقعی‌تر و درک مطلوب‌تر اثر گرادیان فشار در رفتار جریان دی اکسید کربن- نفت لحاظ گردیده است. در این مطالعه، یک معیار کاربردی برای طراحی سیلاب‌زنی نزدیک به فشار امتزاج‌پذیری پیشنهاد شده است که در بسیاری از برنامه‌های کاربردی ذخیره‌سازی دی اکسیدکربن و ازدیاد برداشت از طریق فرآیندهای تزریق گاز دی اکسید کربن مفید است.

رویکرد عددی و نظریه

اخلاقی امیری و همکاران [۳۱]، عملکرد روش تنظیم سطح و میدان فاز را برای مدل‌سازی یک جریان دوفازی در یک محیط متخلخل مصنوعی با تراوایی دوگانه مقایسه کردند. نتایج این مقایسه نشان داد که هر دو روش پدیده‌هایی مثل انگشتی شدن جریان، نفوذ فاز آبی پس از سیلاب‌زنی و تفاوت رفتار جریان در محیط‌هایی با تراوایی متفاوت را می‌توانند پیش‌بینی کنند. اما، پس از شبیه‌سازی یک فرآیند سیلاب‌زنی با هر دو این روش‌ها نتیجه‌گیری شد که جزئیات نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها با روش میدان فاز در مواردی همچون: گرادیان فشاری در حین فرآیند تزریق، ساختار شکل جبهه‌های انگشتی ایجاد شده توسط فاز آبی و تغییرات پروفایل آبی بعد از زمان رسیدن آب انتهای نمونه، نتایج بسیار منطقی تر و منطبق‌تر با نتایج آزمایشگاهی به‌دست می‌دهد.

1. Phase Field Interfacing Capturing Method
2. Gravity Fingers

پژوهش نفت شماره ۱۲۶، آذر و دی ۱۴۰۱، صفحه ۱۰۹-۹۵

همچنین، نتیجه‌گیری شد که روش میدان فاز نسبت به‌روش تنظیم سطح طی تعداد گام های کمتری به همگرایی میرسد. بنابراین، از لحاظ زمان محاسبات مطلوب‌تر است. به‌علاوه، نتایج نشان داد که روش تنظیم سطح به‌خوبی روش میدان فاز توانایی درک اثرگذاری پارامتر کشش سطحی بین سیالات را ندارد و در نتیجه در مواردی سطح مشترک‌های ایجاد شده توسط روش تنظیم سطح دچار ناپایداری می‌شود. همچنین، مشخص شد که روش میدان فاز سرعت سیالات را در طیف وسیع‌تری از اعداد موئینگی نسبت به‌روش تنظیم سطح به‌درستی پیش‌بینی می‌کند. جریان مورد بررسی در این مطالعه، جریان دوفازی غیر امتزاج‌پذیر از نفت و گاز دی اکسید کربن فوق بحرانی است. با توجه به مباحث فوق الذکر پیرامون قابلیت‌های روش‌های مختلف شبیه‌سازی جریان دو فازی در مقیاس، نتیجه‌گیری می‌شود که روش میدان فاز از لحاظ حفظ پایداری جرم، به‌دست آوردن سطح مشترک‌های منطقی و پایدار بین سیالات، درک اثرگذاری پارامتر ترشوندگی روی دیواره‌ها و زمان حل نسبت به سایر روش‌های شبیه‌سازی مستقیم عددی ارجحیت دارد. در این مطالعه نیز از روش میدان فازی، که ترکیبی از روابط ناویر استوکس و کان هیلیارد است، جهت شبیه‌سازی فرآیندهای تزریق گاز دی اکسید کربن فوق بحرانی به مخزن نفتی استفاده شده است. در ادامه خلاصه ای از این روابط آورده شده است.

روابط حاکم

سیستم جریان آرام در نظر گرفته می‌شود و فرض می‌شود که سیالات به‌صورت نیوتونی و تراکم‌ناپذیر می‌باشند. با صرف‌نظرکردن از گرانش، جابه‌جایی سیالات در مقیاس دو بعدی بررسی خواهند شد. برای تفکیک دو فاز توسط یک سطح مشترک نفوذ سیال– سیال، روش میدان فازی کان– هیلیارد [۳۲] با روابط ناویر استوکس و پیوستگی ترکیب شده است. در مدل میدان فازی، که مبتنی بر حداقل اصول انرژی آزاد است، انرژی ترکیبی (f_{mix}) با فرمولاسیون Ginzburg–Landau به‌صورت زیر به‌دست می‌آید [۳۳ و ۳۴]:

$$f_{mix}(\phi,\nabla\phi)=\frac{1}{2}\lambda\left|\nabla\phi\right|^{2}+\frac{\lambda}{4\varepsilon^{2}}(\phi^{2}-1)^{2} \qquad (۱)$$

به حداقل رساندن مولفه گرادیان (اولین عبارت سمت چپ) ما را به‌سمت ترکیب فازها می‌برد و به حداقل رساندن پتانسیل دوگانه (عبارت دوم سمت راست) ما را وارد مرحله تفکیک می‌کند. کشش سطحی به‌عنوان یک ویژگی ذاتی مربوط به‌شدت چگالی انرژی آزاد ناحیه سطحی در نظر گرفته می‌شود. اگر $\varepsilon\to 0$، نسبت λ/ε کشش سطحی در حالت کلاسیک را ایجاد می‌کند [۳۵].

$$\sigma=\frac{2\sqrt{2}\lambda}{3\varepsilon} \qquad (۲)$$

در توضیح روش میدان فاز بیان شد که به‌جای در نظر گرفتن سطح مشترک خطی بین سیالات یک لایه نازک با ضخامت غیر صفر در نظر گرفته می‌شود، که نیروهای مرزی برروی آن به‌طور همگن توزیع می‌شود. به این منظور پارامتر میدان فاز (φ) تعریف می‌شود که در بدنه اصلی سیال‌ها مقدار ثابتی داشته و برروی لایه نازک مرزی تغییر می‌کند. در این تعریف، $-1<\phi<1$ نمایان‌گر محدوده سطحی و $\phi=\pm1$ نشان‌دهنده فازهای خالص می‌باشد. در جریان‌های دوفازی این پارامتر نشان‌دهنده غلظت نسبی هر کدام از سیالات در نقطه مورد نظر است، به‌طوری‌که کسر حجمی فاز اول و دوم به‌ترتیب $\frac{1+\phi}{2}$ و $\frac{1-\phi}{2}$ در نظر گرفته می‌شود. همه ویژگی‌های فیزیکی سیال با استفاده از غلظت‌های نسبی فازها درون‌یابی شده‌اند [۳۱ و ۳۶]:

$$\vartheta(\phi)=\frac{(1+\phi)}{2}\vartheta_{1}+\frac{(1-\phi)}{2}\vartheta_{2} \qquad (۳)$$

که در آن ϑ ویژگی یک فاز مثل ویسکوزیته (μ) و (ρ) را نشان می‌دهد. روابط پیوستگی و ناویر استوکس به‌واسطه شامل شدن یک نیروی سطحی

وابسته به میدان فازی قادر به پیش‌بینی سطح جابه‌جا شونده خواهند بود [۳۱ و ۳۶]. در این پروژه، فرض بر این است که CO_2 و نفت به‌صورت ایده‌آل با یکدیگر در طول تزریق ترکیب می‌شوند و هیچ واکنش شیمیایی رخ نمی‌دهد. روابط حاکم اصلی شامل ناویر استوکس، پیوستگی و روابط میدان فازی کان–هیلیارد ترکیب می‌شوند که در ادامه نشان داده شده است:

$$\rho\frac{\partial u}{\partial t}+\rho(u\cdot\nabla)u=-\nabla p+\nabla\cdot\left[\mu(\nabla u+\nabla u^{T})\right]+G\nabla\varphi \quad (۴)$$

$$\nabla.\ u=0 \quad (۵)$$

$$\psi=-\nabla\cdot\varepsilon^{2}\nabla\varphi+\left(\varphi^{2}-1\right)\varphi \quad (۶)$$

که در آن، p نشان‌دهنده فشار، u میدان سرعت سیال، و t زمان است. علاوه‌براین، Ψ یک پارامتر کمکی برای تجزیه رابطه مرتبه چهارم کان–هیلیارد به دو رابطه مرتبه دوم است، ε پارامتر ضخامت محیط، γ تحرک، λ چگالی انرژی ترکیبی و G پتانسیل شیمیایی است.

$$G=\lambda\left[-\nabla^{2}\phi+\phi\left(\phi^{2}-1\right)/\varepsilon^{2}\right] \quad (۷)$$

روابط حاکم تحت شرایط مرزی استاندارد پیاده‌سازی شدند (به‌عنوان مثال، ورودی، خروجی، عدم لغزش، جداره مرطوب و تقارن). در ذرات مرطوب جامد، شرایط مرزی زیر اعمال می‌گردد:

$$u=0 \quad (۸)$$

$$n.\varepsilon^{2}\nabla\phi=\varepsilon^{2}\cos\theta\left|\nabla\phi\right| \quad (۹)$$

$$n\cdot(\frac{\gamma\lambda}{\varepsilon^{2}})\nabla\psi=0 \quad (۱۰)$$

که در آن n واحد نرمال با جداره و θ زاویه ثابت سطح است. اولین رابطه شرط عدم لغزش را نشان می‌دهد. رابطه دوم، برای شار انتشاری صفر در نظر گرفته شده است و آخرین رابطه نیز شرط مرزی طبیعی است که از تغییر انرژی آزاد کل سرچشمه می‌گیرد. جزئیات مربوط به تئوری فاز–میدان، فرمولاسیون و سایر روابط مرزی را می‌توانید در جای دیگری ببینید [۳۵ و ۳۷].

شرایط مرزی و مقادیر اولیه

برای مدل‌سازی شرایط سیلاب نزدیک به امتزاج‌پذیری موثر در سراسر ناحیه محاسباتی، فاز دی‌اکسیدکربن جابه‌جاکننده از سمت چپ و با فشار ثابت P_{inj} به محیطی که از قبل توسط نفت اشباع گردیده است، تزریق می‌گردد. در همین حال، فشار خروجی در طرف راست محیط متخلخل روی P_{out} تنظیم می‌گردد. در این مطالعه حداقل فشار امتزاج‌پذیری برابر با ۱۲/۷ MPa و حد پایینی مربوط به ناحیه فشاری نزدیک- امتزاج‌پذیر مؤثر برابر با ۱۱/۰۵ MPa براساس روابط تجربی برآورد می‌گردد [۲۲]. از این‌رو P_{inj} برابر با ۱۱/۰۵ MPa + ϵ و P_{out} روی مقدار ۱۱/۰۵ MPa تنظیم شده است. همچنین فشار اولیه P_{init} درسیستم برابر با ۱۱/۰۵ MPa (حد پایینی مینیم فشار امتزاجی براساس معیار موجود) در نظر گرفته شده است. اختلاف فشار بین ورودی و خروجی باید آنقدر کم باشد که جابه‌جایی جریان دو فازی قابل درکی را در مقیاس منفذ پدید آورد. بدین منظور مقدار ε نیز معادل با ۶۰۰ Pa ($\cong$ 0.1 Psi) درنظر گرفته می‌شود که این مقدار با توجه به ابعاد مدل در مطالعه حاضر با میزان افت فشار برابر با ۱ Psi مطابق با مطالعه دانش و همکاران در تزریق نزدیک- امتزاج‌پذیر گاز متان در نفت دکان در یک میکروسیال آزمایشگاهی تطابق و هم‌خوانی دارد. بدین‌وسیله می‌توان نتایج حاصله را با نتایج مربوط به برنامه‌های کاربردی سیلاب بهبود و ازدیاد برداشت نفت واقعی نیز مقایسه کرد. حالت مرزی جداره مرطوب برروی سطوح ذرات با یک زاویه تماس معین (θ) انتخاب شده است.

انواع ویژگی‌های سیال

ویژگی‌های سیالات فازهای نفتی و دی اکسید کربن در دمای خاص را می توانید در جدول ۱ مشاهده کنید. در حین تزریق دی اکسید کربن، هر دو پارامتر دانسیته و ویسکوزیته مربوط به سیالات تحت شرایط نزدیک- امتزاج‌پذیر با توجه به رابطه ۲ از طریق روابط ذیل محاسبه می‌گردد

$$\rho=\rho(\varphi)=\frac{1-\varphi}{2}\rho_{CO2}+\frac{1+\varphi}{2}\rho_{Oil} \quad (۱۱)$$

پژوهش نفت شماره ۱۲۶، آذر و دی ۱۴۰۱، صفحه ۱۰۹-۹۵

جدول ۱ ویسکوزیته و چگالی دی اکسید کربن خالص و فازهای نفتی در سیستم در دمای ثابت.

$T(K)$	$\mu_{out}\,(cP)$	$\rho_{out}(kg/m^3)$	$\mu_{CO_2}\,(cP)$	$\rho_{CO_2}(kg/m^3)$
۳۴۴	۰/۵۵	۷۰۲/۸	۰/۰۲	۳۱۹/۹

$$\mu = \mu(\varphi) = \frac{1-\varphi}{2}\mu_{CO2} + \frac{1+\varphi}{2}\mu_{Oil} \quad (۱۲)$$

از مدل برازش منطقی برای محاسبه کشش سطحی دینامیک با فشار استفاده می‌شود که در آن از نقاط داده شکل ۱ موجود در فعالیت شاور و همکاران استفاده می‌شود [۴۵]:

$$\sigma = \sigma(c) = \frac{a+bp}{1+cp+dp^2} \quad (۱۳)$$

در این رابطه، p فشار موجود در (MPa) و a و b و c و d مقادیری ثابت برابر با ۱۹/۶۸، -۱/۵۵، ۰/۰۰۵ و ۰/۰۰۲ هستند.

هندسه مدل

دامنه محاسباتی در این تحقیق، یک محیط متخلخل ناهمگن به ابعاد μm ۴۳۷۹×۶۳۳۰ است که شامل چند ذره دایره شکل با قطر μm ۳۵۰ است [۳۰]. به‌منظور اعمال ساختار ناهمگن، قطر بیست دانه به‌طور تصادفی حدود ۵٪ کاهش یا افزایش یافته است. دانه‌های سبز رنگ، دانه‌هایی با قطر کاسته شده و دانه‌های قرمز رنگ دانه‌هایی با قطر افزایش یافته می‌باشند (شکل ۲). توزیع اندازه منافذ محیط متخلخل منتخب در شکل ۳ نشان داده شده است. مشخصات دقیق دامنه شبیه‌سازی شده نیز در جدول ۲ بیشتر توضیح داده شده است.

انتخاب مش و شماتیک عددی

در این مطالعه از عناصر مثلثی برای حل دامنه و مش‌بندی استفاده شده است. عناصر مش ریزتر نیز برای کانال‌های باریک و گلوگاه‌های منافذ کوچک انتخاب شدند درحالی‌که از عناصر درشت برای بدنه منافذ استفاده شده است. برای افزایش دقت مدل، حداقل از سه عنصر در باریک‌ترین گلوگاه‌ها استفاده شده است (شکل ۴). اخلاقی امیری و حمودا [۳۶] نشان دادند که چنانچه میانگین قطر منفذ در محیط متخلخل به‌عنوان طول مشخصه (lc) و عدد کان نیز به‌صورت Cn=ε/lc تعریف گردد، همگرایی مش در این مدل با فرض Cn=۰/۰۳ و اندازه مش ε ۰/۸۴ =h برآورده می‌گردد. بعد از لحاظ نمودن عدد کان معین و محاسبه سایز مش متوسط براساس اهداف این مطالعه، میانگین تعداد عناصر مش مورد استفاده در این مدل‌های شبیه‌سازی شده برابر با ۲۰۶۷۳۶ شد. پارامتر تحرک‌پذیری میدان فاز (γ) باید آنقدر بزرگ باشد که بتواند ضخامت سطحی ثابت را کم و بیش حفظ کند و آنقدر کوچک باشد که حرکت همرفتی را نیز حفظ نماید [۳۵]. اخلاقی امیری و حمودا [۳۶] نشان دادند که شبیه‌سازی با $0/1 < \gamma \leq 1$ باعث افت انقباض حجمی سیالات در شبیه‌سازی مساله جریان دو فازی می‌شود، بنابراین، از γ=۱ در این مطالعه برای رابطه میدان فازی استفاده شده است. پیش از این در این فعالیت، مدل عددی پیاده‌سازی شده با روش تحلیلی جریان Poiseuille دو فازی راستی آزمایی گردید [۳۶ و ۳۷] و دقت کاملی نیز به‌دست آمد.

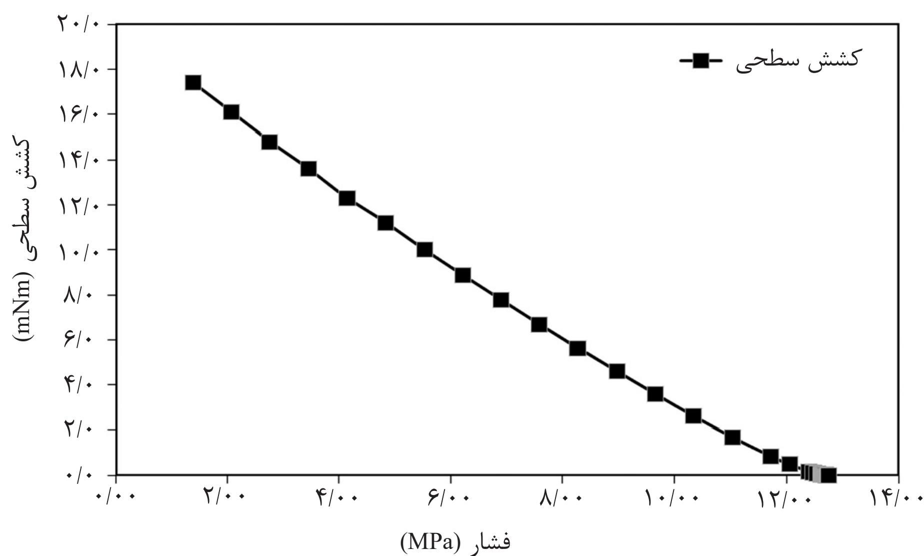
نتایج و بحث

در این بخش به ارائه نتایج حاصل از شبیه‌سازی براساس دو حالت اصلی ذیل پرداخته می‌شود:

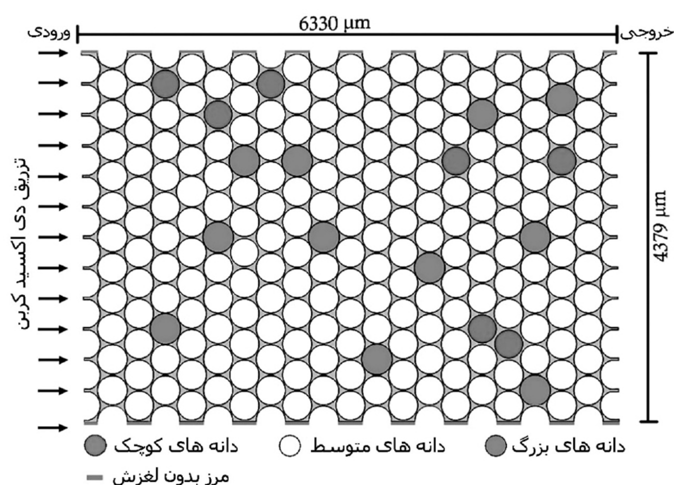
۱ - روش میدان فازی[1] در محدوده پایینی ناحیه فشاری نزدیک-امتزاج‌پذیر مؤثر[2]

۲- مطالعه ما و همکاران (با بهره‌گیری از روش میدان فازی در محدوده پایینی ناحیه فشاری نزدیک- امتزاج‌پذیر مؤثر)

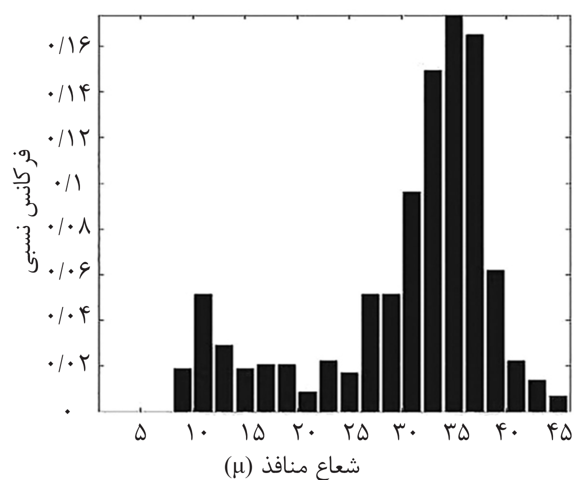
1. Phase Field
2. Lower Boundaries of Effective Near-Miscible Pressure Region



شکل ۱ کشش سطحی مبتنی بر فشار



شکل ۲ هندسه دامنه محاسباتی. ورودی و خروجی با فلش سیاه مشخص شده است. ناحیه تیره و خاکستری به‌ترتیب عبارت‌اند از منافذ/گلوگاه و ماتریس سنگی

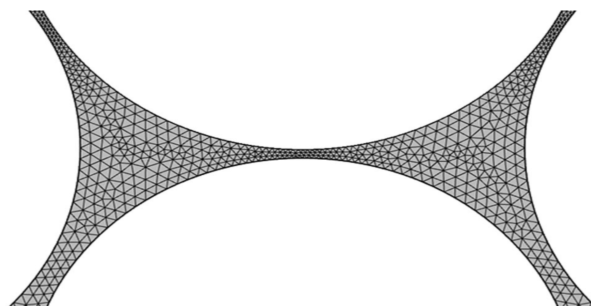


شکل ۳ توزیع اندازه منافذ مدل ناهمگن

پژوهش نفت شماره ۱۲۶، آذر و دی ۱۴۰۱، صفحه ۱۰۹-۹۵

جدول ۲ ویژگی‌های دامنه محاسباتی

نفوذپذیری مطلق (Darcy)	تخلخل	میانگین اندازه ذره (μm)	میانگین قطر منافذ (μm)	عرض (μm)	طول (μm)
۲	۰/۳۵	۳۵۰	۳۰/۴۷	۴۳۷۹	۶۳۳۰



شکل ۴ عناصر مش مثلثی در بخش گسترده دامنه محاسباتی شامل گلوگاه‌های نرمال، کانال‌های باریک و بدنه‌های متخلخل

در ادامه به بررسی و تحلیل نتایج حاصل از شبیه‌سازی حالت ۱ و مقایسه آن با نتایج حاصل از مطالعه ما و همکاران [۳۰] (حالت ۲). که آن نیز با به‌کارگیری روش میدان فازی صورت پذیرفته است، پرداخته می‌شود. شایان ذکر است در مطالعه حاضر شبیه‌سازی مربوط به مطالعه ما و همکاران با فرضیات ارائه شده در مقاله مربوطه مجددا بازتولید گشته و نتایج حاصله مورد صحت سنجی قرار گرفته است به‌طوری‌که مهم‌ترین آنها یعنی نمودار بازیافت نهایی نفت حاصل از شبیه‌سازی کنونی، کاملا با نمودار ارائه شده توسط ما و همکاران در مقاله مربوطه، مطابق شکل ۵، منطبق است:

تغییرات توزیع اشباع دی اکسید کربن

در گام نخست، تغییر تدریجی توزیع اشباع دی اکسید کربن در زمان‌های مختلف (زمان‌های اولیه، زمان میان‌شکنی و زمان نهایی شبیه‌سازی) در شکل ۶ مربوط به‌حالت‌های ۱ و ۲ ارائه گردیده است. در نگاه نخست به‌خوبی مشاهده می‌شود که در زمان‌های یکسان میزان نفوذ دی اکسید کربن و در نتیجه مقدار غلظت آن در حالت ۱ نسبت به‌حالت دیگر به میزان قابل توجهی بیشتر است به‌طوری‌که زمان میان‌شکنی[1] برای حالت ۱ نیز زودتر از حالت دیگر رخ داده است. این امر نشان‌دهنده آن است که میزان جاروب شدگی[2] مربوط به‌حالت ۱ به مقدار قابل توجهی بیشتر از نتایج حاصله از مطالعه ما و همکاران است به‌طوری‌که مقایسه نتایج در زمان انتهایی شبیه‌سازی به‌وضوح مبیّن این موضوع است.

لازم به ذکر است که در نظر گرفتن دانه‌هایی[3] با سه اندازه مختلف (کوچک، معمولی و بزرگ) در ساختار منفذی مدل منجر به ناهم‌گونی می‌شود، از این رو پدیده انگشتی گرانرو[4] در نتایج شبیه‌سازی دو حالت مذکور پدیدار می‌شود.

بحث و تحلیل پیرامون مشاهدات حاصله از تغییرات توزیع اشباع دی اکسید کربن را می‌توان با مکانیزم شناختی در دو موضوع دنبال و پیگیری نمود.

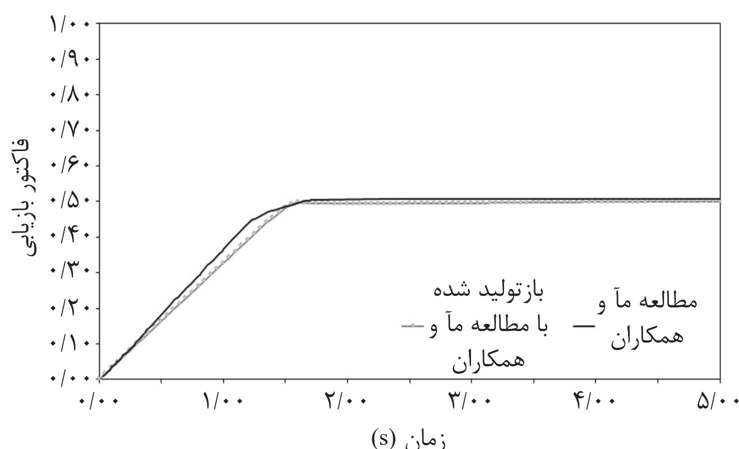
موضوع نخست: بررسی پیرامون کانتورهای فشار در سرتاسر مدل مقیاس- منفذ و برای کلیه زمان‌ها از زمان ابتدائی تا زمان انتهایی شبیه‌سازی و با در نظر گرفتن مقدار فشار در مرز ورودی و خروجی مدل.

موضوع دوم: بررسی میزان نفت به دام افتاده/ نفت کنار-گذر[5] پیرامون دانه‌های کوچک تا بزرگ.

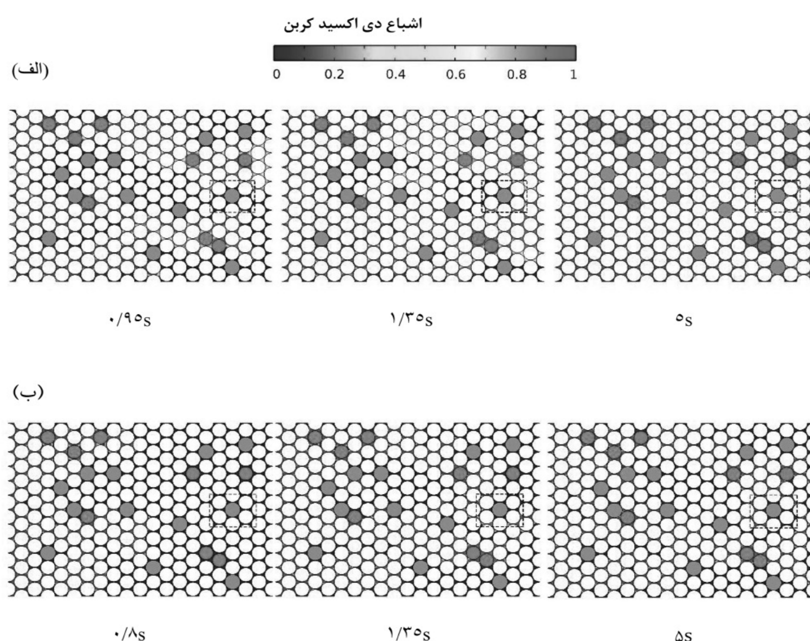
بررسی کانتور فشار

شبیه‌سازی موارد مربوط به مطالعه حاضر با فرض مرز فشار ثابت در ورودی و خروجی انجام یافته است.

1. Breakthrough Time
2. Sweep Efficiency
3. Grains
4. Fingering
5. By-passed Oil/ Trapped Oil



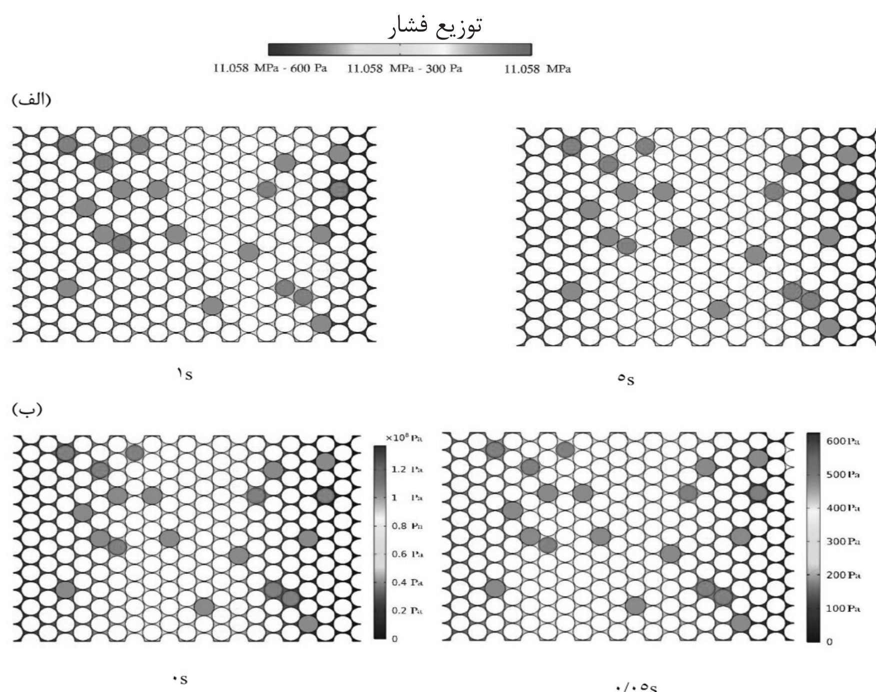
شکل ۵ صحت‌سنجی مدل بازتولید شده با مطالعه مآ و همکاران



شکل ۶ تکامل زمانی توزیع اشباع دی اکسید کربن محاسبه شده تحت الف) مدل‌سازی صورت گرفته و ب) مطالعه ما و همکاران

این‌طور که در تمام زمان شبیه‌سازی (از زمان ابتدائی تا زمان انتهایی) اختلاف فشار در سرتاسر مدل مطابق شکل ۷- الف ثابت بوده به‌طوری‌که هم فشار ورودی و هم فشار خروجی هر دو در محدوده پایینی فشار مؤثر نزدیک امتزاج‌پذیری قرار می‌گیرد. همان‌طورکه پیش‌تر نیز در بخش "تئوری و مدل" اشاره گردید مقدار افت فشار در این مطالعه برابر با ۶۰۰ Pas (تقریبا برابر با ۰/۱ Psi) قرار داده شده است که این مقدار با توجه به ابعاد مدل در مطالعه حاضر در مقایسه با ابعاد به‌کار رفته در مطالعه دانش و همکاران و در نظر گرفتن میزان افت فشار برابر با ۱ Pas (در تزریق نزدیک-امتزاج‌پذیر گاز متان در نفت دکان در یک میکرو سیال آزمایشگاهی) تطابق و هم‌خوانی دارد.درحالی‌که در ارتباط با حالت دوم، مطالعه‌ای که توسط ما و همکاران صورت پذیرفته است، صرفاً فشار اولیه در محدوده پایینی فشار مؤثر نزدیک امتزاج‌پذیری در نظر گرفته شده است و با اعمال فشار خروجی برابر با صفر!، با گذشت زمان بسیار اندکی از شبیه‌سازی، مطابق شکل ۷-ب کل کانتور فشار در سرتاسر مدل در ناحیه فشار غیرامتزاج‌پذیر قرار می‌گیرد.

پژوهش نفت شماره ۱۲۶، آذر و دی ۱۴۰۱، صفحه ۱۰۹-۹۵



شکل ۷ مقایسه کانتور فشار الف) مدل میدان فازی و ب) مطالعه ما و همکاران

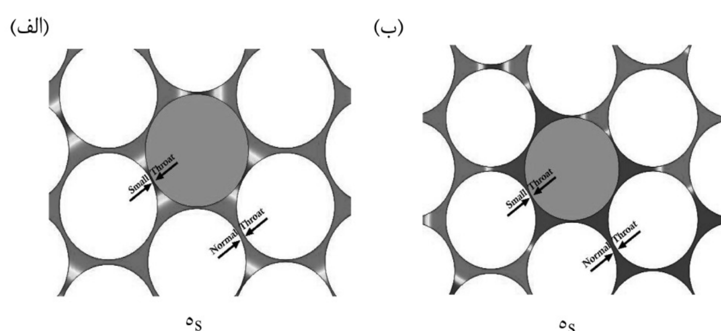
از این‌رو شبیه‌سازی مذبور از مزایای فشار بالای فرآیند تزریق نزدیک امتزاج‌پذیری برخوردار نمی‌باشد.

اشباع نفت باقی‌مانده

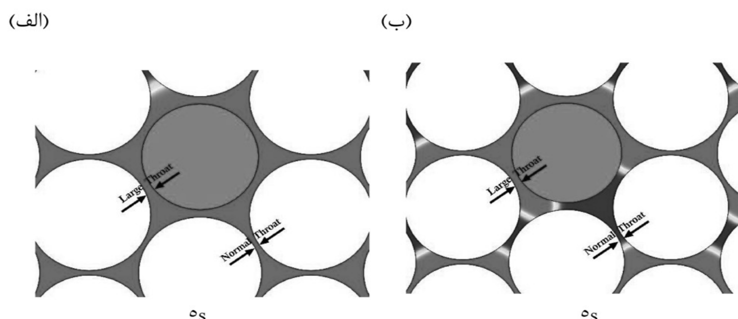
با به‌کارگیری مدل دسته لوله[1] در محیط متخلخل و براساس رابطه هاگن-پویزله[2]، مشخص می‌گردد که نرخ حجمی جریان ویسکوز در یک گرادیان فشار مشخص، متناسب با توان چهارم شعاع منفذی تغییر می‌یابد [۳۸ و ۳۹]. لذا، یک تغییر نسبتاً جزئی در شعاع منافذ در مدل مقیاس- منفذ، منجر به تغییر قابل توجهی در نرخ حجمی جریان سیال عبوری از منافذ (به‌واسطه جریان ویسکوز) می‌گردد، که این امر موجب می‌شود هنگام مواجهه سیال با منافذ با شعاع‌های گوناگون (یک محیط ناهمگن) ولیکن همگی تحت شرایط یکسان (گرادیان فشار)، منافذ با شعاع‌های بزرگتر جهت عبور سیال ترجیح داده شود [۴۰]. از این‌رو در این بخش از مطالعه، تمرکز برروی قسمتی از مدل که دارای منافذ با شعاع کوچک است، قرار گرفته است. لازم به ذکر است هر چند که در ناحیه نزدیک- امتزاج‌پذیری مقدار کشش سطحی[3] صفر نیست ولیکن به‌واسطه مقادیر بسیار کم کشش سطحی در این ناحیه فشاری، نیروهای مویینگی دیگر نیروهای غالب نخواهند بود و رفتار جریان سیال در منافذ (محیط متخلخل)، به‌جهت پیروی از قوانین حاکم بر جریان ویسکوز، به مراتب تابع قوی‌تری از شعاع منافذ نسبت به نیروهای مویینگی و یا کشش سطحی خواهند بود. برای هر منفذی، یک فشار مویینگی آستانه[4] جهت ورود سیال براساس شعاع منفذ وجود دارد. ولیکن همان‌طورکه اشاره شد، به‌واسطه تزریق گاز در ناحیه نزدیک- امتزاج‌پذیر (و به‌تبع آن مقادیر کم کشش سطحی)، مقاومت این فشار در مقابل ورود گاز به منافذی که توسط نفت کنارگذر اشغال شده، بسیار کوچک است. لذا فشار گاز ورودی به‌راحتی بر مقاومت فشار مویینگی آستانه غلبه نموده و سطح مشترک را به‌داخل فاز نفت می‌کند. از اینرو مقادیر بیشتری از نفت موجود در منافذ در تماس با گاز قرار می‌گیرد که سبب افزایش بازیابی نفت از این منافذ می‌گردد [۱۶، ۴۱ و ۴۲].

1. Bundle of Tube
2. Hagen-Poiseuille
3. Interfacial Tension
4. Threshold Capillary Pressure

جهت بررسی دقیق‌تر، تطبیق و تفسیر مکانیسم ارائه شده بر میزان نفت باقی‌مانده (نفت کنار-گذر) در گلوگاه‌های کوچک تا نرمال، زمان انتهایی ران‌های شبیه‌سازی مربوط به‌حالت‌های ۱ و۲ مطابق شکل ۸ ارائه گردیده است. همان‌طورکه مشاهده می‌شود به‌دلیل گرادیان فشاری بالاتر در حالت ۱ (مطالعه حاضر) نسبت به‌حالت ۲ (مطالعه ما و همکاران)، میزان اشباع نفت باقی‌مانده مربوط به‌حالت ۱ در گلوگاه‌های نرمال در مجاورت با گلوگاه‌های کوچک به میزان قابل‌توجه (در برخی موارد حتی نزدیک به اشباع صفر) و در گلوگاه‌های کوچک نیز به حد پایین‌تری کاهش یافته است. هرچند که در این مطالعه تمرکز برروی گلوگاه با شعاع کوچک می‌باشد ولیکن با مراجعه و بررسی پیرامون نفت به دام افتاده در پیرامون گلوگاه‌های با شعاع بزرگتر که در شکل ۹ ارائه شده مشاهده می‌شود که میزان اشباع نفت باقی‌مانده مربوط به‌حالت ۱ در گلوگاه‌های بزرگ به‌میزان بسیار قابل توجهی (اشباع صفر) کاهش یافته است که این رفتار در گلوگاه‌های نرمال در مجاورت با گلوگاه‌های بزرگ نیز تکرار شده است. همان مکانیسمی که در منافذ حاکم است در منافذ نیمه-بن بست[1] نیز غالب است که منجر به افزایش بازیابی نفت به دام افتاده در این منافذ می‌شود. مطابق تصاویر ارائه شده در شکل ۱۰ میزان نفت باقی‌مانده در این منافذ در لحظه نهایی شبیه‌سازی، مربوط به‌حالت ۱ (مطالعه حاضر) تقریباً برابر با نیمی از میزان نفت باقی‌مانده در همین منافذ مربوط به‌حالت ۲ (یعنی مطالعه ما و همکاران) می‌باشد. نتایج حاصل از این مطالعه با نتایج حاصل از تحقیق سهرابی [۱۶] و سیدی [۲۸] مربوط به تحت شرایط نزدیک- امتزاج‌پذیری به‌ترتیب از طریق تزریق گاز متان و گاز دی اکسید کربن در یک چیپ میکروفلوید که با نرمال دکان اشباع شده است، مطابقت می‌نماید.



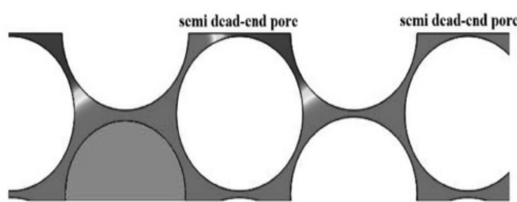
شکل ۸ بخش مشخص شده از مدل مقیاس منافذ در گلوگاه‌های نرمال تا کوچک طی تزریق دی اکسید کربن در شرایط نزدیک-امتزاج‌پذیری در زمان انتهای مدل‌سازی تحت الف) مطالعه حاضر و ب) مطالعه ما و همکاران



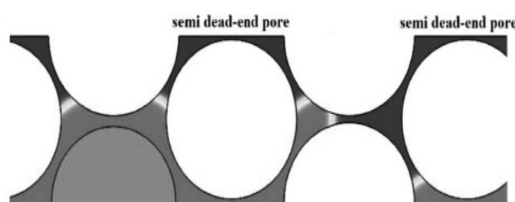
شکل ۹ بخش مشخص شده از مدل مقیاس منافذ در گلوگاه‌های نرمال تا بزرگ طی تزریق دی اکسید کربن در شرایط نزدیک-امتزاج‌پذیری در زمان انتهای مدل‌سازی تحت الف) مطالعه حاضر و ب) مطالعه ما و همکاران

1. Semi Dead-end Pores

(الف)



(ب)



شکل ۱۰ بزرگ نمایی قسمت بالایی مدل به‌منظور مقایسه بهتر منافذ نیمه- بن‌بست در هر دو حالت الف) مطالعه حاضر و ب) مطالعه ما و همکاران

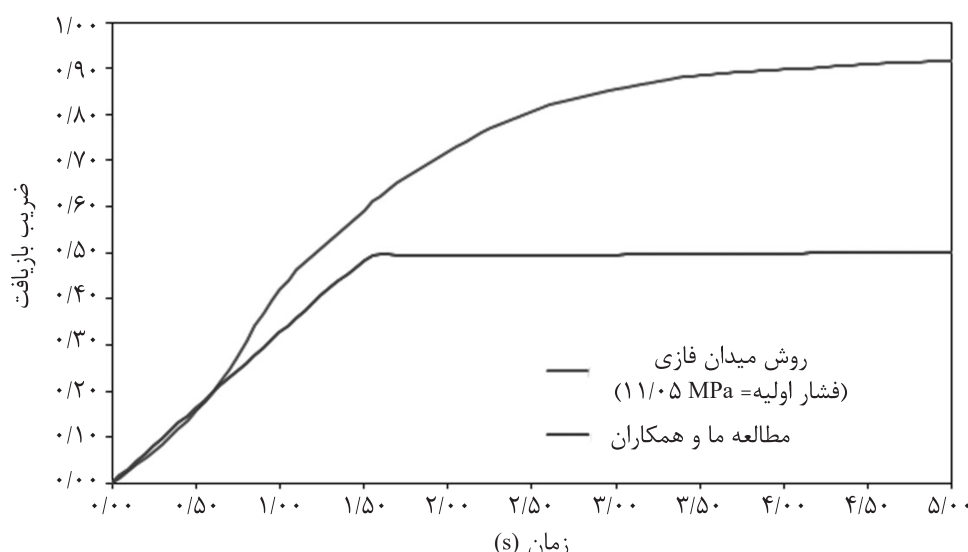
بدین صورت همگی بر حصول میزان افزایش بازیابی نفت تا مقادیر بالا یعنی مقادیر نزدیک به امتزاج‌پذیری کامل دلالت می‌نماید. مکانیسم مربوط به بازیابی نفت کنار-گذر که در تزریق گاز نزدیک- امتزاج‌پذیر پدیدار می‌شود، در فرآیند تزریق گاز غیرامتزاجی رخ نمی‌دهد. بدین صورت که در فرآیند غیرامتزاج‌پذیر، به‌دلیل بالا بودن میزان کشش سطحی، فشار مویینگی آستانه نسبتا قوی‌تری در سطح تماس نفت و گاز ایجاد می‌شود که در مقابل ورود گاز به منافذی که توسط نفت کنار-گذر اشغال شده است، مقاومت می‌نماید [۲۹].

ضریب بازیافت نفت

همان‌طورکه بحث شد، در ابتدای تزریق به‌واسطه حضور ناهمگنی در مدل، دی‌اکسیدکربن ابتدا از منافذ بزرگتر عبور می‌کند و به‌دلیل تحرک‌پذیری[1] بالا به سرعت به‌سمت انتهای مدل حرکت می‌نماید. از اینرو مقدار نفت قابل توجهی به‌صورت نفت کنار- گذر باقی می‌ماند. پس از زمان کوتاه و پدیدار شدن میان شکنی، گاز دی‌اکسیدکربن به منافذ نرمال و در صورت امکان به منافذ کوچکتر حرکت می‌نماید. به‌طور کلی، نفت کنار-گذر به‌واسطه نسبت تحرک‌پذیری نامطلوب[2]، غلبه گرانش[3] (در صورت وجود)، ساختار ناهمگن[4]، منافذ بسته/ نیمه بسته، فاز آب (در صورت وجود) و ناپایداری ویسکوزیته[5] (پدیده انگشتی گرانرو) در مقیاس -منفذ[6]، پدیدار می‌شود. بنابراین با توجه به مکانیسم ارائه شده در بخش پیشین (اشباع نفت باقی‌مانده) و مطابق شکل ۱۱، میزان بازیافت مربوط به‌حالت۱ (یعنی مطالعه حاضر) تقریبا برابر با ۹۲٪ بوده است، که این عدد در مقایسه با حالت ۲ (مطالعه ما و همکاران) به‌میزان بیش از ۴۰٪ افزایش یافته است. ذکر این نکته ضروری است که با مراجعه مجدد به نتایج حاصل از شبیه‌سازی حالت ۲ یعنی مطالعه ما و همکاران و با یادآوری این نکته که فشار در سرتاسر مدل به‌سرعت و در زمان بسیار کوتاهی به فشارهای خیلی پایین (یعنی نواحی به‌شدت غیر امتزاج‌پذیر) تنزل یافته است، مطابق شکل ۱۱ ضریب بازیافت مربوط به‌حالت ۲ به‌دلیل همین عدم احراز شرایط نزدیک-امتزاج‌پذیری مؤثر سبب کاهش چشم‌گیر میزان بازیابی نفت نسبت به مطالعه حاضر گردیده است.

به‌عبارت دیگر حفظ فشار مدل در شرایط فشاری نزدیک- امتزاج‌پذیری مؤثر، در طول زمان شبیه‌سازی و در سرتاسر مدل از ورودی تا خروجی به‌منظور غلبه بر فشار مویینگی آستانه منافذ سبب می‌شود که فرآیند تزریق گاز نزدیک- امتزاج‌پذیری به‌عنوان یک فرآیند مؤثر پیشنهاد و به‌کار گرفته شود. ساختار منافذ در نظر گرفته شده در این مطالعه متناظر با برخی از مخازن نفتی ماسه‌سنگی[7] نیز است.

1. Mobility
2. Undesirable Mobility Ratio
3. Gravity Override
4. Heterogeneities
5. Viscous Instability
6. Pore-Scale
7. Sandstone



شکل ۱۱ ضریب بازیافت نفت مطالعه حاضر (میدان فازی) در مقایسه با مطالعه ما و همکاران

برخلاف ارتباط[1] نسبتاً خوب بین منافذ ، این ساختار به‌طور اجتناب‌ناپذیری دارای ناهمگنی مشخصی می‌باشد [۴۳]. به‌هنگام اجرای شبیه‌سازی عددی در مقیاس میدان مشخص نمودن نمودارهای تراوایی نسبی و فشار مویینگی برحسب اشباع نفت به‌منظور کنترل و بررسی رفتار جریانی نفت-گاز از پارامترهای کلیدی به‌شمار می‌رود. لازم به ذکر است تابعیت فشار مویینگی برحسب کشش‌سطحی کاملا مشخص و معین می‌باشد و همچنین تحقیقات فراوانی به‌منظور ارائه بهتر و دقیق‌تر تابعیت نمودارهای تراوایی نسبی برحسب کشش سطحی صورت پذیرفته است که این تابعیت‌ها به‌هنگام فرآیندهای تزریق گاز نزدیک- امتزاج‌پذیر و یا امتزاج‌پذیر از اهمیت ویژه‌ای برخودار می‌گردد [۴۴ و ۴۵]. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در مقیاس منفذ حاصل از مطالعه حاضر بیانگر این موضوع می‌باشد که در شرایط نزدیک- امتزاج‌پذیری به‌هنگام تعیین پارامترهای کلیدی مربوط به مقیاس میدان، میزان اشباع نفت باقی‌مانده در نمودارهای تراوایی نسبی و مقدار فشار مویینگی می بایستی به مقدار قابل‌توجهی کمتر از مقادیری باشند که تحت شرایط تزریق غیر امتزاجی به‌کار برده می‌شوند و این مقادیر در حالت حدی به‌حالت تزریق امتزاج‌پذیر نزدیک می‌شوند جایی‌که میزان اشباع نفت باقی‌مانده و فشار مویینگی تا مقادیر بسیار کوچک (نزدیک به صفر) را نیز در بر می‌گیرد.

نتیجه‌گیری

معمولا به‌هنگام فرآیند تزریق گاز، در مواجهه با ساختار منافذ ناهمگن، تزریق گاز به‌صورت امتزاج‌پذیر به‌منظور حصول ماکزیمم بازیافت، پیشنهاد می‌شود که به‌موجب آن تأمین و نگهداشت فشار امتزاجی با مشکلات عملیاتی مربوطه و در نتیجه افزایش هزینه‌ها همراه خواهد بود. در این مطالعه شبیه‌سازی عددی در مقیاس- منفذ جهت بررسی رفتار جریانی نفت-دی‌اکسیدکربن، بازدهی بازیافت نفت و شناخت مکانیسم جابه‌جایی در فرآیند تزریق گاز نزدیک-امتزاج‌پذیر در یک محیط متخلخل ناهمگن صورت پذیرفته است. نتایج حاصل از تحلیل کمی مطالعه حاضر گواه این مدعی است که با احراز شرایط فشاری نزدیک- امتزاج‌پذیری مؤثر در طول زمان شبیه‌سازی و در سرتاسر محیط متخلخل از ورودی تا خروجی مدل به‌منظور غلبه بر فشار مویینگی آستانه در منافذ، می‌توان به مقادیر بازیافت‌های بسیار بالاتری دست پیدا نمود.

1. Connectivity

از این‌رو، تزریق گاز نزدیک- فشار امتزاجی به‌عنوان یک فرآیند مؤثر و یک راه‌کار جایگیزین از لحاظ اقتصادی و عملیاتی نسبت به تزریق گاز در فشار امتزاج‌پذیر پیشنهاد می‌گردد.

مراجع

[1]. Koch Jr H (1956) High pressure gas injection is a success, World Oil, 143: 260.
[2]. Stone H, Crump J (1956) The effect of gas composition upon oil recovery by gas drive, Transactions of the AIME, 207, 01: 105-110.
[3]. Chen S M, Allard D, Anli J (1984) Factors affecting solvent slug size requirements in hydrocarbon miscible flooding, in SPE Enhanced Oil Recovery Symposium, OnePetro.
[4]. Garmeh G, Johns R T (2010) Upscaling of miscible floods in heterogeneous reservoirs considering reservoir mixing, SPE Reservoir Evaluation and Engineering, 13, 05: 747-763.
[5]. Han J, Han S, Sung W, Lee Y (2018) Effects of CO_2 miscible flooding on oil recovery and the alteration of rock properties in a carbonate reservoir, Journal of CO_2 Utilization, 28: 26-40.
[6]. Gozalpour F, Ren S R, Tohidi B (2005) CO_2 EOR and storage in oil reservoir, Oil and Gas Science and Technology, 60, 3: 537-546.
[7]. Jia B, Tsau J S, Barati R (2019) A review of the current progress of CO_2 injection EOR and carbon storage in shale oil reservoirs, Fuel, 236: 404-427.
[8]. Li H, Zheng S, Yang D (2013) Enhanced swelling effect and viscosity reduction of solvent (s)/CO_2/heavy-oil systems, SPE Journal, 18, 04: 695-707.
[9]. Yongle H U, Mingqiang H A O, Guoli C H. E N, Ruiyan S U N, Shi L I (2019) Technologies and practice of CO_2 flooding and sequestration in China, Petroleum Exploration and Development, 46, 4: 753-766.
[10]. Holtz M H, Nance P K, Finley R J (2001) Reduction of greenhouse gas emissions through CO_2 EOR in Texas, Environmental Geosciences, 8, 3: 187-199.
[11]. Ding M, Gao M, Wang Y, Qu Z, Chen X (2019) Experimental study on CO_2-EOR in fractured reservoirs: Influence of fracture density, miscibility and production scheme, Journal of Petroleum Science and Engineering, 174: 476-485.
[12]. Al-Bayati D, Saeedi A, Myers M, White C, Xie Q (2019) Insights into immiscible supercritical CO_2 EOR: An XCT scanner assisted flow behaviour in layered sandstone porous media, Journal of CO_2 Utilization, 32: 187-195.
[13]. Chen H, Liu X, Zhang C, Tan X, Yang R, Yang S, Yang J (2022) Effects of miscible degree and pore scale on seepage characteristics of unconventional reservoirs fluids due to supercritical CO_2 injection, Energy, 239: 122287.
[14]. Shyeh-Yung J (1991) Mechanisms of miscible oil recovery: effects of pressure on miscible and near-miscible displacements of oil by carbon dioxide, in SPE Annual Technical Conference and Exhibition, OnePetro.
[15]. Song C, Yang D (2017) Experimental and numerical evaluation of CO_2 huff-n-puff processes in Bakken formation, Fuel, 190: 145-162.
[16]. Sohrabi M, Danesh A, Tehrani D H, Jamiolahmady M (2008) Microscopic mechanisms of oil recovery by near-miscible gas injection, Transport in Porous Media, 72, 3: 351-367.
[17]. Fatemi S M, Sohrabi M (2013) Experimental investigation of near-miscible water-alternating-gas injection performance in water-wet and mixed-wet systems, SPE Journal, 18, 01: 114-123.
[18]. Bui L H, Tsau J S, Willhite G P (2010) Laboratory investigations of CO_2 near-miscible application in Arbuckle reservoir, in SPE Improved Oil Recovery Symposium, OnePetro.
[19]. Zhang X, Chen H, Li B, Yang G, Shen X (2018) Determination of minimum near-miscible pressure during CO_2 flooding in an offshore oilfield. in IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, IOP Publishing.
[20]. Yu H, Lu X, Fu W, Wang Y, Xu H, Xie Q, Lu J (2020) Determination of minimum near miscible pressure region during CO_2 and associated gas injection for tight oil reservoir in Ordos Basin, China, Fuel, 263: 116737.
[21]. Chen H, Li B, Zhang X, Wang Q, Wang X, Yang S (2019) Effect of gas contamination and well depth on pressure interval of CO_2 near-miscible flooding, Journal of Petroleum Science and Engineering, 176: 43-50.
[22]. Chen H, Li B, Duncan I, Elkhider M, Liu X (2020) Empirical correlations for prediction of minimum miscible pressure and near-miscible pressure interval for oil and CO_2 systems, Fuel, 278: 118272.
[23]. Er V, Babadagli T, Xu Z (2010) Pore-scale investigation of the matrix− fracture interaction during CO_2 injection in naturally fractured oil reservoirs, Energy and Fuels, 24, 2: 1421-1430.
[24]. Saboniha E, Rokhforouz M R, Kazemi A, Ayatollahi S (2021) Numerical analysis of two-phase flow in heterogeneous porous media during pre-flush stage of matrix acidizing: Optimization by response surface meth-

odology, Physics of Fluids, 33, 5: 053605.
[25]. Sabooniha E, Rokhforouz M R, Ayatollahi S (2019) Pore-scale investigation of selective plugging mechanism in immiscible two-phase flow using phase-field method, Oil and Gas Science and Technology–Revue d'IFP Energies Nouvelles, 74: 78.
[26]. Jafari, I. and M.-R. Rokhforouz (2020) Numerical modeling of water oil two-phase flow during counter-current spontaneous imbibition in porous media at pore-scale. Petroleum Science and Technology, 38, 24: 1040-1053.
[27]. Huang F, Xu R, Jiang P, Wang C, Wang H, Lun Z (2020) Pore-scale investigation of CO_2/oil exsolution in CO_2 huff-n-puff for enhanced oil recovery, Physics of Fluids, 32, 9: 092011.
[28]. Seyyedi M, Sohrabi M (2020) Oil Reservoir on a chip: Pore-scale study of multiphase flow during near-miscible CO_2 EOR and storage, Transport in Porous Media, 134, 2: 331-349.
[29]. Zhu G, Yao J, Li A, Sun H, Zhang L (2017) Pore-scale investigation of carbon dioxide-enhanced oil recovery, Energy and Fuels, 31, 5: 5324-5332.
[30]. Ma Q, Zheng Z, Fan J, Jia J, Bi J, Hu P, Wang D (2021) Pore-scale simulations of CO_2/oil flow behavior in heterogeneous porous media under various conditions, Energies, 14, 3: 533.
[31]. Amiri H A, Hamouda A A (2013) Evaluation of level set and phase field methods in modeling two phase flow with viscosity contrast through dual-permeability porous medium, International Journal of Multiphase Flow, 52: 22-34.
[32]. Cahn J W, Hilliard J E (1958) Free energy of a nonuniform system, I. Interfacial free energy, The Journal of Chemical Physics, 28, 2: 258-267.
[33]. AlMubarak T, AlKhaldi M, AlMubarak M, Rafie M, Al-Ibrahim H, AlBokhari N (2015) Investigation of acid-induced emulsion and asphaltene precipitation in low permeability carbonate reservoirs, in SPE Saudi Arabia Section Annual Technical Symposium and Exhibition, OnePetro.
[34]. Suzuki F (1993) Precipitation of asphaltic sludge during acid stimulation treatment: cause, effect, and prevention, in SPE Western Regional Meeting, OnePetro.
[35]. Yue P, Zhou C, Feng J J, Ollivier-Gooch C F, Hu H H (2006) Phase-field simulations of interfacial dynamics in viscoelastic fluids using finite elements with adaptive meshing, Journal of Computational Physics, 219, 1: 47-67.
[36]. Amiri H A, Hamouda A A (2014) Pore-scale modeling of non-isothermal two phase flow in 2D porous media: Influences of viscosity, capillarity, wettability and heterogeneity, International Journal of Multiphase Flow, 61: 14-27.
[37]. Hoteit H (2013) Modeling diffusion and gas–oil mass transfer in fractured reservoirs, Journal of Petroleum Science and Engineering, 105: 1-17.
[38]. Carman P C (1937) Fluid flow through granular beds, Transactions of the Institution of Chemical Engineers, 15: 150-166.
[39]. Kozeny J (1927) Uber kapillare leitung der wasser in boden, Royal Academy of Science, Vienna, Proceedings Class I, 136: 271-306.
[40]. Chen, X. and K.K. Mohanty (2020) Pore-scale mechanisms of immiscible and miscible gas injection in fractured carbonates. Fuel. 275: 17909.
[41]. Williams J K, Dawe R A (1988) Photographic observations of unusual flow phenomena in porous media at interfacial tensions below 0.1 mN m− 1, Journal of Colloid and Interface Science, 124, 2: 691-696.
[42]. Jamiolahmady M, Danesh A, Tehrani D H, Duncan D B (2000) A mechanistic model of gas-condensate flow in pores, Transport in Porous Media, 41, 1: 17-46.
[43]. Chen T, Yang Z, Luo Y, Lin W, Xu J, Ding Y, Niu J (2018) Evaluation of displacement effects of different injection media in tight oil sandstone by online nuclear magnetic resonance, Energies, 11, 10: 2836.
[44]. Khazam M M, Danesh A, Tehrani D H, Todd A C, Burgass R (1994) Dynamic validation of phase behaviour models for reservoir studies of gas injection schemes, in SPE Annual Technical Conference and Exhibition, OnePetro.
[45]. Li F F, Yang S L, Chen H, Zhang X, Yin D D, He L P, Wang Z (2015) An improved method to study CO_2–oil relative permeability under miscible conditions, Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 5, 1: 45-53.

پژوهش نفت شماره ۱۲۶، آذر و دی ۱۴۰۱، صفحه ۱۲۵-۱۱۰

تعیین خصوصیات مخزن با استفاده از داده‌های حسگرهای پمپ‌های شناورالکتریکی و انجام آنالیز فشار گذرا

یاسین خلیلی، یوسف رفیعی* و محمد شریفی
دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۳۱

چکیده

امروزه شرکت‌های نفتی می‌بایست هزینه تمام شده به ازای تولید هر بشکه نفت را به کمترین حالت خودش برسانند. اینجاست که مفهوم بهینه‌سازی و پایش چاه‌ها می‌تواند امری حیاتی برای شرکت‌های نفتی باشد. انجام آزمایش‌های فشار گذرا راهی معقول برای ارزیابی رفتار دینامیک چاه و مخزن می‌باشد، چراکه شعاع ارزیابی بیشتری نسبت به سایر روش‌ها دارد. انجام اینگونه آزمایش‌ها همچون آزمایش ساق مته هزینه بر بوده و در فواصل زمانی خاصی بررسی می‌شوند و نیازمند تجهیزات به خصوصی هستند. امروزه استقبال زیادی در بکارگیری روش‌های فرازآوری مصنوعی به خصوص استفاده از پمپ‌های شناور الکتریکی در میادین و چاه‌های تولیدی ایران به عمل آمده است، تا نرخ تولید بهینه را حفظ کنند. این پمپ‌ها به حسگرها و گیج‌هایی مجهز بوده که با بکارگیری پتانسیل این حسگرها و بررسی داده‌های پایش توسط آنها می‌توان راحت‌تر به آنالیز آزمایش‌های فشار گذرا و بررسی عمکرد دینامیک چاه و مخزن پرداخت. این حسگرها که در واحدی به نام واحد پایش ته‌چاهی در زیر موتور الکتریکی پمپ نصب می‌شوند، در سطح برای ما پارامترهایی همچون فشار ورودی، فشار تخلیه، دمای ورودی، دمای تخلیه و غیره را ضبط می‌کنند که ما می‌توانیم با آنالیز داده‌های فشار ورودی بر حسب زمان ثبت شده به وسیله علم چاه‌آزمایی، در مدت زمان مشخص به بررسی رفتار دینامیک چاه و مخزن بپردازیم. در این مقاله با بکارگیری داده‌های ثبت شده توسط پمپ شناور الکتریکی یکی از میادین جنوب غربی ایران و با به‌کارگیری علم چاه‌آزمایی، رفتار دینامیک چاه و مخزن مورد آنالیز، شاخص‌های کلیدی و عملکرد چاه و مخزن مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است و با مقایسه داده‌های حاصل از چاه‌آزمایی ساق مته و ناچیز بودن درصد اختلاف در حدود کمتر از ۸٪ بین نتایج آنالیزها، نتایج قابل قبولی حاصل شد که نشان از مفید و مقرون به صرفه بودن این بررسی است.

کلمات کلیدی: پایش، پمپ شناور الکتریکی، مدیریت مخزن، رفتار دینامیک چاه و مخزن، آنالیز فشار گذرا

---

*مسؤول مکاتبات
آدرس الکترونیکی y.rafiei@aut.ac.ir
شناسه دیجیتال: (DOI:10.22078/PR.2022.4816.3158)

مقدمه

به جهت فهم بهتر و بررسی دقیق‌تر موضوع مورد مطالعه، مقدمه در پنج بخش نوشته شده که در این پنج بخش سعی شده تمام مطالب و جنبه‌های مرتبط با پژوهش انجام شده مطرح شود.

پایش مخازن نفت و گاز

نظارت و ثبت شرایط چاه و مخازن تحت الارضی نفت و گاز، اولین اقدام در شناخت بهتر شرایط رفتار دینامیکی مخازن و مدیریت بهینه تولید از آن‌ها می‌باشد. این در حالی است که مدیریت موفق تولید از مخازن، تحت تأثیر شرایط متغیر فرآورش، انتقال و توزیع و صادرات نفت و گاز می‌باشد و به واقع، صرفاً در صورت نظارت، کنترل و بهینه نمودن کل زنجیره می‌توان از رفتار صحیح هریک از اجزاء آن مطمئن بود. امروزه مدیریت منابع نفت و گاز نیازمند عملکرد موفق، صرفه اقتصادی، پایش[1] مداوم و به موقع چاه‌هاست. پایش کامل و دقیق از وضعیت تولید و دینامیک تزریق، می‌تواند تولید را بهینه نموده و بازیابی را به حداکثر برساند و ما را نسبت به وضعیت چاه و مخزن آگاه کند [۱ و ۲].

به طور کلی می‌توان گفت که مدیریت موثر یک مخزن نیازمند انجام اقدامات زیر است:

۱- پایش پارامترهای کلیدی به صورت آنی[2]

۲- تحلیل و بررسی داده‌ها

۳- تبدیل داده‌های تحلیل شده به اطلاعات قابل اعتماد

۴- گرفتن تصمیمات حیاتی و پیش‌گیرانه (شکل ۱) [۳].

با در نظر گرفتن و انجام موارد مطرح شده در قسمت قبل می‌توان:

۱- رفتار دینامیک و خصوصیات سازند را به خوبی ارزیابی کرد

۲- میزان بهره‌وری را افزایش داد

۳- در جهت عیب‌یابی و کاهش میزان خطرات و هزینه‌ها اقدام کرد [۳].

ورود سیستم‌های پایش درون‌چاهی دائمی[3] در صنعت شامل حسگرهای[4] فشار، دما و جریان‌سنج‌ها باعث شده است که رفتار دینامیک مخزن به صورت پیوسته اندازه‌گیری شده و عدم قطعیت‌ها در مورد پارامترهای مختلف جهت تطبیق تاریخچه مدل‌های شبیه‌سازی از بین رفته و یا به صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش یابد. پردازش و تفسیر داده‌های فشار و دما درون‌چاهی که به صورت پیوسته ثبت می‌شوند مشخصات استاتیکی و دینامیکی مخزن را به ما می‌دهند که می‌تواند جهت توسعه و بهینه کردن فرآیند تولید مورد استفاده قرار گیرد [۴ و ۵].

گرینگارتن مدیریت مخزن را این گونه تعریف کرده است: کاربرد تکنولوژی و دانش در یک مخزن در جهت افزایش تولید با هزینه پایین‌تر [۶]. این جمله خود گویای اهمیت بکارگیری سیستم‌های پایش درون‌چاهی به جهت مدیریت بهینه و موثر مخزن است.

حسگرهای فشاری برای اندازه‌گیری فشار ته‌چاهی مورد استفاده قرار می‌گیرند که می‌توانند کاربردهای دیگری همچون موارد زیر داشته باشند:

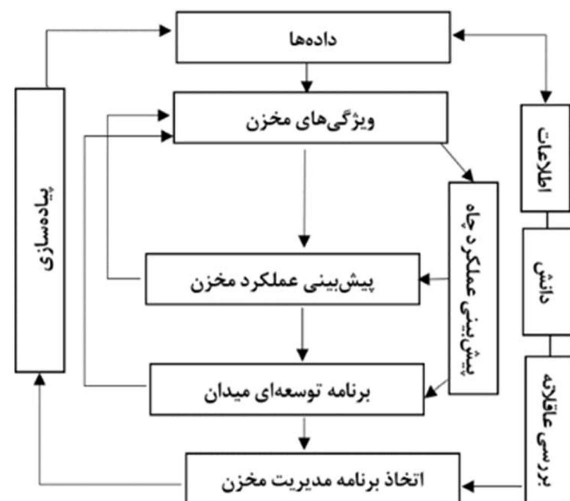
- پایش فشار (بررسی فشار استاتیک درون‌چاهی)
- حفظ و نگهداشت فشار[5] (برنامه‌های توسعه‌ای مخزن از نظر فشار افزایی مجدد)
- چاه‌آزمایی[6] (با بررسی انواع آزمایش‌های چاه‌آزمایی همچون ساخت فشار[7] و افت فشار[8] و تفسیر و به دست آوردن داده‌های مخزنی همچون تراوایی و ضریب پوسته[9]) [۷ و ۸].

چاه‌آزمایی (آنالیز فشار گذرا)

چاه‌آزمایی یکی از کاربردی‌ترین شاخه‌های مهندسی نفت است که ضمن دارا بودن مبانی تئوری و عملیاتی می‌تواند به عنوان چکیده تمامی مباحث مهندسی نفت در نظر گرفته شود.

1. Monitoring
2. Real-time
3. Permanent Downhole Gauge (PDG)
4. Sensors
5. Pressure Maintenance
6. Well Test Interpretation and Analysis
7. Pressure Build-up
8. Pressure Draw-down
9. Skin Factor

پژوهش نفت شماره ۱۲۶، آذر و دی ۱۴۰۱، صفحه ۱۲۵-۱۱۰



شکل ۱ نمودار بلوکی فرآیند مدیریت مخزن [۳].

در دهه ۱۹۲۰، هدف از آنالیز فشار گذرا[1]، نمونه‌گیری از سیال مخزن و همچنین به‌دست آوردن فشار متوسط مخزن بود، ولی به تدریج از آن برای محاسبه تراوایی و ضریب پوسته[2] مخزن استفاده شد. در سال‌های پیش که هنوز از عبارت آنالیز فشار گذرا به جای عبارت چاه‌آزمایی استفاده می‌شد طی یک سری عملیات چاه‌آزمایی داده‌ها را جمع‌آوری می‌کردند و سپس با رسم نمودارهای نیمه لگاریتمی و هورنر به آنالیز آنها می‌پرداختند. انجام عملیات چاه‌آزمایی و تفسیر داده‌های حاصل از آن در مراحل مختلف عمر چاه و مخزن هیدروکربوری شامل اکتشاف، ارزیابی، توسعه، توصیف مخزن و مهندسی بهره‌برداری، نقش مهمی ایفا می‌کند [۹ و ۱۰].

به طور کلی کاربرد عملیات چاه‌آزمایی عبارتند از:

۱- ارزیابی مخزن[3]

۲- مدیریت مخزن[4]

۳- توصیف مخزن[5].

یکی از متداول‌ترین روش‌های چاه‌آزمایی در چاه‌های اکتشافی و توصیفی، آزمایش ساق مته[6] می‌باشد. این آزمایش برای گردآوری و تکمیل اطلاعات مخزن انجام می‌گردد. گرفتن نمونه سیال مخزن، اندازه‌گیری فشار مخزن و تراوایی سازند، میزان آسیب وارده به سازند در حین حفاری، شعاع بررسی، دانسیته و گرانروی نفت نیز از جمله اطلاعاتی است که می‌توان از طریق آزمایش ساق مته به‌دست آورد. آزمایش ساق مته معمولا توسط یک شیر درون‌چاهی انجام می‌گیرد. این شیر برای باز و بسته کردن انتهای لوله‌ها برای عبور سیال استفاده می‌شود و از سطح کنترل می‌شود. یک یا چند گیج فشاری به کار می‌رود و نتایج ثبت شده پس از پایان آزمایش، تفسیر می‌شوند [۱۱].

تجهیز پایش درون‌چاهی به کمک پمپ‌های شناور الکتریکی و ارتباط آن با چاه‌آزمایی

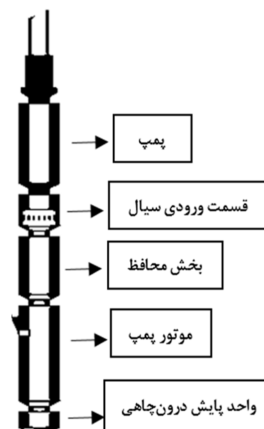
یکی از رایج‌ترین و پرکاربردترین پمپ‌ها به ویژه در میادین فراساحلی، پمپ‌های شناور الکتریکی هستند. این پمپ‌ها برای اولین بار توسط آرمیس آروتونف (موسس شرکت روسی سازنده پمپ‌های الکتریکی شناور REDA) ابداع گردید. این پمپ‌ها با استفاده از انرژی سانتریفوژ[7] و با به گردش درآوردن سیال درون چاه، باعث افزایش فشار خروجی و ایجاد هد[8] بیشتر در سیال می‌شوند [۱۲].

یکی از اجزای نصب شده بر روی پمپ‌های شناور الکتریکی، واحد پایش ته‌چاهی[9] است. این واحد از حسگرهای ته‌چاهی جهت پایش پارامترهایی همچون دما و فشار ته‌چاهی بهره برده و در زیر موتور الکتریکی نصب می‌شود و از دو بخش اصلی تشکیل شده است:

۱- اجزای ته‌چاهی[10]

۲- اجزای سطحی جهت خواندن اطلاعات[11] که امکان آنالیز آنی و عیب‌یابی را به ما می‌دهد [۱۳ و ۱۴]. در شکل ۲ شماتیکی از پمپ شناورالکتریکی به همراه واحد پایش درون‌چاهی آن ارائه گردیده است.

1. Pressure-Transient Analysis
2. Skin Factor
3. Reservoir Evaluation
4. Reservoir Management
5. Reservoir Description
6. Drill Stem Tool (DST)
7. Centrifuge
8. Head
9. Downhole Monitoring Equipment ¬(DME)
10. Downhole Components
11. Read Out



شکل ۲ شماتیک واحد پایش ته‌چاهی نصب شده در پمپ شناور الکتریکی [۱۴].

انجام آزمایش‌های فشار گذرا راهی معقول برای ارزیابی رفتار دینامیک چاه و مخزن می‌باشد. انجام اینگونه آزمایش‌ها همچون آزمایش ساق مته هزینه بر و نیازمند حضور دکل حفاری بوده و در فواصل زمانی خاصی بررسی می‌شوند و نیازمند تجهیزات به خصوصی هستند. در کنار این امر، امروزه استقبال زیادی در بکارگیری روش‌های فرازآوری مصنوعی به خصوص استفاده از پمپ‌های شناور الکتریکی در میادین و چاه‌های تولیدی ایران به عمل آمده است، تا نرخ تولید بهینه را حفظ کنند و این پمپ‌ها همان‌طور که اشاره شد به حسگرها و گیج‌هایی مجهز بوده که با به‌کارگیری پتانسیل این حسگرها و بررسی داده‌های پایش توسط آنها می‌توان راحت‌تر به آنالیز آزمایش‌های فشار گذرا و بررسی عمکرد دینامیک چاه و مخزن پرداخت [۱۵-۱۷].

به‌کارگیری و طراحی موفق سیستم ESP-DST در آنالیز فشار گذرای مخازن

با افزایش سطح دانش و تکنولوژی همواره کشورها و شرکت‌های مختلف نفتی به دنبال راهی موثر، مطمئن و اقتصادی به جهت افزایش بهره‌برداری از مخازن نفتی همچون به کارگیری روش‌های نوین ازدیادبرداشت نفت[1] و فرازآوری مصنوعی[2] بوده‌اند. همان‌طور که پیش از این بیان شد، یکی از رایج‌ترین روش‌های فرازآوری مصنوعی به‌کارگیری پمپ‌های شناور-الکتریکی بوده چراکه نقاط قوت منحصر به فردی همچون ظرفیت تولید بسیار بالا، کاهش فشار ته‌چاهی و افرایش فشار سرچاهی به میزان دلخواه، انعطاف‌پذیری بالا نسبت به شرایط ویژه درون‌چاهی (زاویه انحراف، عمق، دما، برش آب [3] و غیره) را دارا می‌باشد [۱۷ و ۱۸]. علم چاه‌آزمایی به عنوان یکی از مؤثرترین روش‌های تعیین خصوصیات مخازن، درک جامعی از رفتار دینامیک مخزن، ساختار زمین‌شناسی و همچنین قابلیت تحویل‌دهی سیال را ایجاد می‌کند اما انجام عملیات چاه‌آزمایی هزینه‌بر بوده و آزمایش‌های مختلف آن در فواصل زمانی خاصی بررسی می‌شوند و نیازمند تجهیزات به خصوصی هستند. با توجه به انتخاب آزمایش ساق مته به عنوان یکی از آزمایش‌های متداول و مفید چاه‌آزمایی، در طی سال‌های اخیر پژوهش‌های مختلفی در زمینه به‌کارگیری این آزمایش در کنار پمپ شناور الکتریکی به جهت مدیریت بهتر مخزن و افزایش بهره‌وری صورت گرفته است. از جمله این پژوهش‌ها می‌توان به مخازن نفت سنگین به عنوان یکی از مهم‌ترین منابع نفتی جهان اشاره کردکه با توجه به افزایش تقاضا برای تولید منابع هیدروکربوری در طی دهه‌های اخیر، تلاش‌های فراوانی به جهت بهره‌برداری هر چه بیشتر از این مخازن انجام شده است. چاه‌آزمایی مخازن نفت سنگین بدلیل ماهیت پیچیده نفت سنگین و چالش‌هایی که دارد موضوعی بسیار مهم است. در این مطالعات که خلاصه‌ای از آن در جدول ۱ ارائه گردیده است، بررسی شده که می‌توان رشته تکمیل را به نحوی طراحی کرد که بتوان هم از پتانسیل DST در امر آنالیز فشار گذرا استفاده و پارامترهای مهم چاه و مخزن را مورد ارزیابی قرار داد و هم از پتانسیل ESP بهره برده و به حفظ و نگهداشت تولید پرداخت و بر چالش‌های موجود فایق آمده و محدودیت‌هایی که در نتیجه افزایش ویسکوزیته، تولید شن و ماسه و یا ایجاد امولسیون‌ها در این مخازن ممکن است ایجاد شود را محدود کرد و بهره‌وری را افزایش داد [۱۹].

1.Enhanced Oil Recovery
2. Artificial Lift
3. Water Cut

جدول ۱ مروری بر مطالعات انجام شده از به‌کارگیری سیستم ESP-DST در آنالیز فشار گذرای چاه و مخزن.

نام پژوهشگر اول	سال انتشار مقاله	نام ژورنال/کنفرانس	خلاصه پژوهش	شماره مرجع
Dosmukhambetov, I.	۲۰۲۲	One Petro	این مقاله ترکیب منحصر به فردی از فنآوری به کارگیری رشته DST در کنار پمپ ESP در سواحل دریای خزر که یک منطقه پربار انباشت هیدروکربنی است و قابلیتهای خوبی که این تکنیک به جهت اجرای آزمایشهای تولیدی (PLT) در زیر پمپ فراهم میکند را بیان کرده و راهکارهای خوبی به جهت مواجهه با چالشهای موجود در تولید نفت سنگین این منطقه ارائه کرده است.	[۲۴]
Dosmukhambetov, I.	۲۰۲۰	One Petro	این مقاله نمونه موفق بکارگیری سیستم ESP-DST در آنالیز دادههای فشار گذرای میادین ماسه سنگی دریای خزر به جهت به دست آوردن پارامترهای مخزنی همچون تراوایی، ضریب پوسته، بهره‌وری چاه و غیره را بیان کرده و چالشهای موجود همچون وجود نفت سنگین و جامدات همچون شن و ماسه را مطرح کرده است.	[۲۵]
De Leonardis, D.	۲۰۱۷	One Petro	این مقاله به رویکردی نوین جهت طراحی بهینه سیستم ESP-DST سازگار با شرایط پیچیده مخزنی همچون وجود چاههایی با سیالات مختلف، عمق کم، حفاری شده به صورت افقی، دارای گسل و وجود ناهمگنی می‌پردازد و در این راستا از علم چاه آزمایی بهره می‌برد.	[۲۶]
Beck, D.	۲۰۱۴	European Association of Geoscientists and Engineers	این مقاله به بررسی رویکردی به جهت طراحی رشته مناسب ESP-DST جهت آنالیز دادههای فشار گذرای مخازن نفت سنگین دارای چاههای افقی پرداخته است.	[۲۷]

اهمیت پژوهش انجام شده

آزمایش ساق مته، آزمایشی ارزشمند جهت تعیین خصوصیات مخازن به شمار می‌رود و چه در حالت معمولی به‌کارگرفته شود یا به همراه پمپ ESP عملکرد خوبی از خود نشان داده است اما ذکر این نکته حائز اهمیت است که:

۱- انجام آزمایش ساق مته نیازمند حضور دکل حفاری می‌باشد

۲- نیازمند به‌کارگیری تجهیزات خاص شامل مجموعه‌ای از شیرها و پکر می‌باشد

۳- جهت انجام آن باید لوله حفاری را از گل حفاری تخلیه کرد که خود نیازمند تزریق سیالی سبک همچون گازوئیل است

۴- برای انجام این آزمایش می‌بایست در طی مراحلی چاه بسته شود و تولیدی صورت نگیرد [۱۱].

این عوامل نشان می‌دهد که انجام این آزمایش نیازمند صرف هزینه و زمان زیادی می‌باشد، حال آنکه ما در این پژوهش بررسی کردیم که می‌توان با به‌کارگیری حسگرهای پایشی در پمپ‌های شناور الکتریکی و آنالیز داده‌های پایش شده پمپ، به خوبی شرایط چاه و مخزن مورد بررسی قرار داد و به عنوان روشی نوین و چاه‌آزمایی محور در این گونه چاه‌ها آن را در نظر گرفت و در هزینه‌های حضور دکل و تجهیزات صرفه‌جویی کرد. به عبارتی هم می‌توان از این پمپ‌ها در امر فرازآوری و حفظ و نگهداشت چاه بهره برد هم با آنالیز فشار گذرای چاه و مخزن حاصل از داده‌های پایش شده توسط حسگرهای این پمپ‌ها به مدیریت موثر مخزن پرداخت.

روش کار

در این مطالعه موردی داده‌های پایش شده توسط پمپ شناورالکتریکی دو مورد از چاه‌های یکی از

میادین جنوب غرب ایران مورد بررسی قرار گرفته است و با نتایج آنالیز فشار گذرای حاصل شده از آزمایش ساق مته مرتبط با داده‌های فشاری همان چاه‌ها مقایسه به عمل آمده است و رفتار دینامیک چاه و مخزن در چاه‌های این میدان مورد ارزیابی قرار گرفته است.

در این میدان به مرور زمان با توجه به کاهش فشار سیال درون مخزن که منجر به کاهش نرخ تولید نفت می‌شد، تصمیم گرفته شد که به منظور حفظ و نگهداشت تولید از پمپ‌های شناور الکتریکی استفاده شود.

آنالیز فشارگذرای داده‌های پایش شده توسط پمپ شناورالکتریکی در میدان مورد بررسی

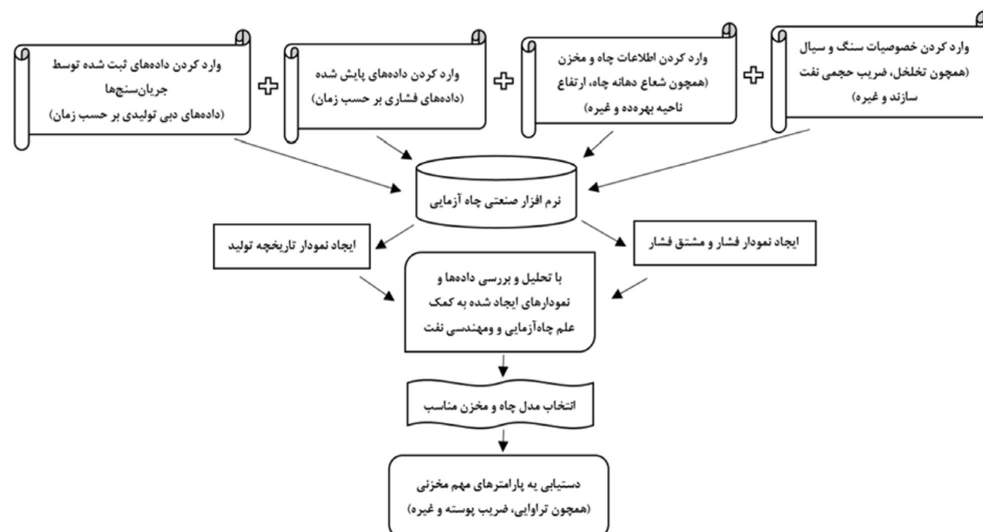
مراحل آنالیز فشار گذرای داده‌های پایش شده به صورت خلاصه در شکل ۳ ارائه گردیده است.

خصوصیات سنگ و سیال این میدان

خصوصیات سنگ و سیال چاه‌های میدان مورد بررسی در جدول ۲ ارائه شده است.

وارد کردن داده‌های پایش شده و ایجاد نمودارهای تاریخچه تولید

داده‌های پایش شده فشار ورودی پمپ[1] بر حسب زمان را وارد نرم افزار صنعتی سفیر (سفیر نرم‌افزاری از کمپانی کپا بوده که در پکیج اکرین ارائه می‌شود و یکی از رایج‌ترین نرم افزارهای صنعتی چاه‌آزمایی، جهت به دست آوردن پارامترهای مخزنی با استفاده از آنالیز فشار گذرا می‌باشد) کرده و نمودارهای تاریخچه تولید حاصل گردید (شکل ۴). نمودار بالا که روند افزایشی و کاهشی فشار را دارد، نشان دهنده تاریخچه داده‌های فشار بر حسب زمان تولیدی و نمودار پایین که به صورت بازه‌های زمانی به شکل مستطیل است، نشان دهنده تاریخچه دبی تولیدی بر حسب زمان در این چاه‌ها می‌باشد. بازه زمانی داده‌های استفاده شده به مدت یک سال می‌باشد. در طول این مدت همان‌طور که از نمودارهای تاریخچه تولید مشاهده می‌شود، در بازه‌های زمانی مختلف دوره‌های تولیدی و افت فشار متفاوت که گاهی طولانی مدت و گاهی کوتاه مدت و گاهی به دلیل مشکلاتی ممکن بود برای پمپ ایجاد شود از جمله تولید جامدات، تولید گاز آزاد، نوسانات جریان برق و فرکانس و غیره پمپ خاموش و به منظور عملیات عیب‌یابی و تعمیر، داده‌های آن بخش در دسترس نباشد، این امر در چاه شماره ۱ به وضوح مشاهده می‌شود.

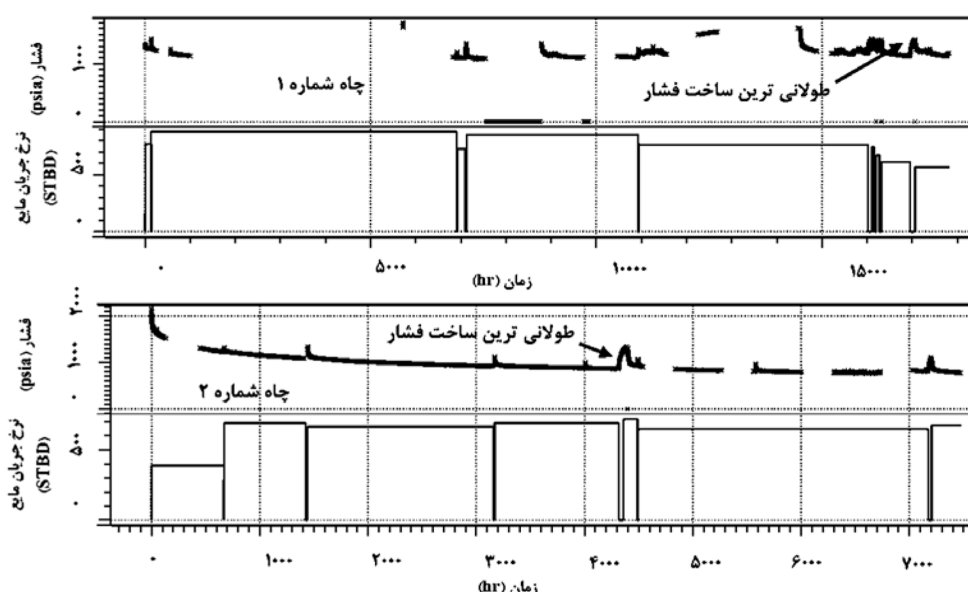


شکل ۳ نمودار بلوکی مراحل آنالیز فشارگذرای داده‌های پایش شده

1.Intake Pressure

جدول ۲ خصوصیات سنگ و سیال میدان مورد بررسی.

اطلاعات	نوع مخزن	شعاع دهانه چاه (ft)	ناحیه بهره‌دهی (ft)	تخلخل	ضریب حجمی نفت سازند (bbl/stb)	ویسکوزیته نفت (cp)	ضریب تراکم‌پذیری کل (۱/psi)
چاه شماره ۱	نفتی	۰/۳۵۴	۵۶/۹۸۸	۰/۱۵۴	۱/۲۴	۱/۰۳	۰/۰۰۰۰۱۴۲
چاه شماره ۲	نفتی	۰/۳۵۴	۱۱۵/۷۸۰	۰/۱۵۷	۱/۲۴	۱/۰۲	۰/۰۰۰۰۱۳۸



شکل ۴ تاریخچه تولید ایجاد شده توسط داده‌های پمپ ESP برای دو چاه میدان مورد بررسی.

ایجاد نمودارهای فشار و مشتق فشار جهت تفسیر داده‌ها

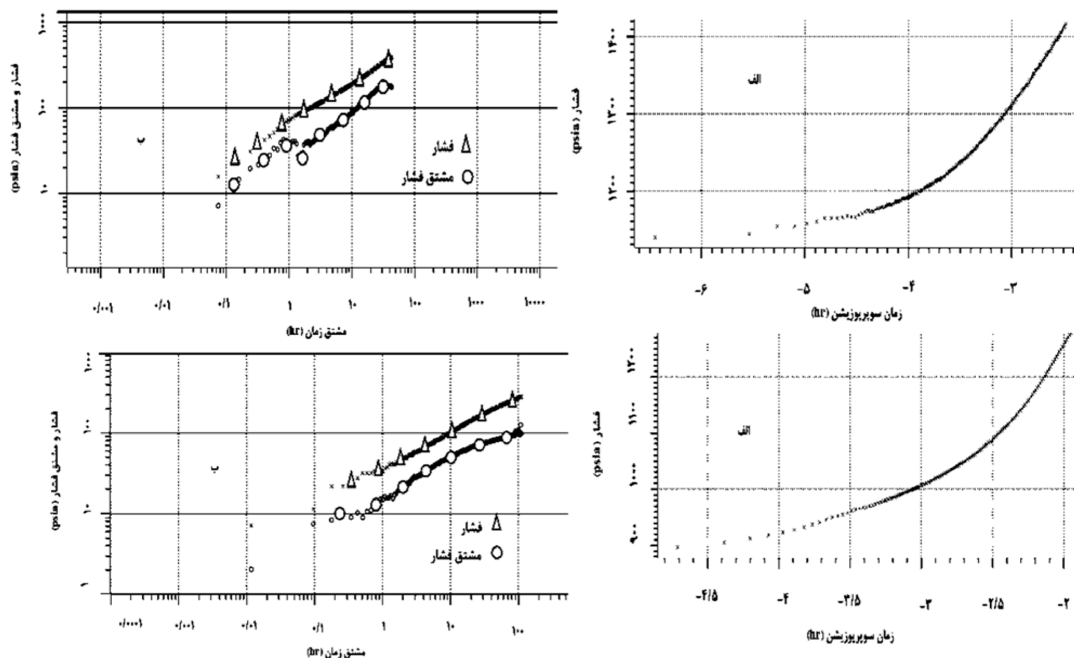
در این قسمت با توجه به نمودار تاریخچه تولید، نمودارهای فشار و مشتق فشار و نمودار نیمه لگاریتمی فشار که مهم‌ترین نمودارها به جهت تفسیر و انتخاب مدل چاه و مخزن می‌باشند، ایجاد شدند (شکل ۵). به جهت تفسیر بهتر عملکرد چاه و مخزن طولانی‌ترین دوره ساخت فشار انتخاب شد (شکل ۴). در شکل ۵ نموداری که با علامت دایره نشان داده شده است، نمودار مشتق فشار و نموداری که با علامت مثلث نشان داده شده است، نمودار فشار می‌باشد.

انتخاب مدل چاه و مخزن

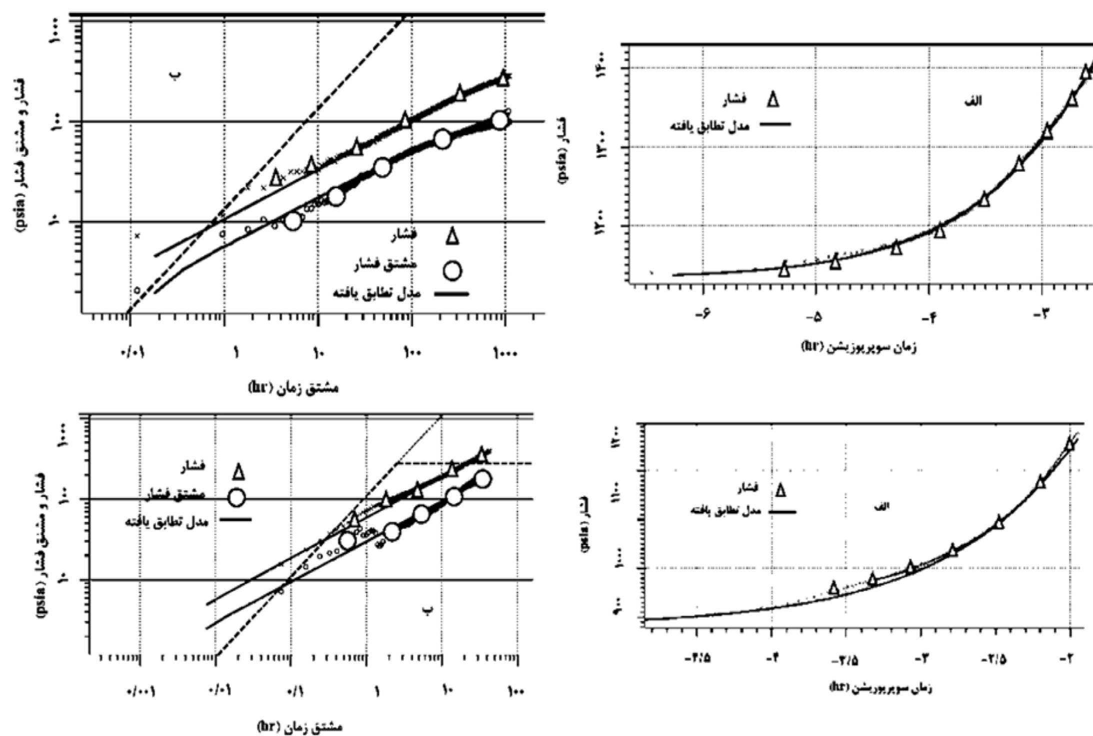
با توجه به نمودار فشار و مشتق فشار حاصل شده و با علم چاه‌آزمایی و دید مهندسی نفت و با در نظر گرفتن مدل‌های انتخاب شده برای آزمایش ساق مته به عنوان معیاری اصلی مقایسه، مدل مناسب چاه و مخزن انتخاب شد که در جدول ۳ نتایج آن ذکر شده است. با توجه به مدل‌های انتخاب شده همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، تطابق خوبی حاصل شده است. در هنگام تفسیر داده‌های چاه‌آزمایی به منظور انتخاب مدل چاه و مخزن ما با سه ناحیه روبرو هستیم:

ناحیه زمان اولیه[1]: شامل اطلاعات فشاری مربوط به چاه و ناحیه اطراف آن در زمان‌های اولیه تولید از مخزن است و نشان‌دهنده اثر ذخیره چاه، پوسته و شکاف القایی می‌باشد [۲۰ و ۲۱]. با توجه به اینکه ناحیه اولیه دو نمودار فشار و مشتق فشار هر

1. Early Time Region (ETR)



شکل ۵ الف-نمودارهای فشار ب- نمودارهای مشتق فشار. حاصل شده برای دو چاه میدان مورد بررسی، حاصل شده از داده‌های پمپ ESP. به ترتیب ردیف اول چاه شماره ۱ و ردیف دوم چاه شماره ۲.



شکل ۶ الف-نمودارهای فشار ب- نمودارهای مشتق فشار. حاصل شده از داده‌های پمپ ESP بعد از انتخاب مدل مناسب. به ترتیب ردیف اول چاه شماره ۱ و ردیف دوم چاه شماره ۲.

پژوهش نفت شماره ۱۲۶، آذر و دی ۱۴۰۱، صفحه ۱۲۵-۱۱۰

جدول ۳ مدل چاه و مخزن انتخاب شده برای تفسیر داده‌ها در نتیجه آنالیز داده‌های پمپ ESP.

مدل مرز مخزن	مدل مخزن	مدل چاه	مدل ناحیه دهانه چاه	اطلاعات
نامحدود	مخزن تخلخل دوگانه	چاه عمودی	اثر ذخیره چاه ثابت	چاه شماره ۱
نامحدود	مخزن همگن	چاه شکافدار-با جریان یکنواخت	اثر ذخیره چاه ثابت	چاه شماره ۲

دو چاه روی خط راست با شیب یک قرار گرفته‌اند، مدل دهانه چاه به عنوان اثر ذخیره چاه ثابت انتخاب گردید.

ناحیه زمان میانی[1]: همگن یا ناهمگن بودن مخزن را نشان می‌دهد و اطلاعات فشاری و پارامترهای مهم مخزنی مربوط به آنالیزهای چاه‌آزمایی را شامل می‌شود [۲۰ و ۲۲]. با توجه به نمودار فشار و مشتق فشار، برای هر دو چاه مدل چاه عمودی انتخاب که چاه شماره ۱ با توجه به انحرافی که دارد به صورت کامل در مخزن نفوذ پیدا کرده و چاه شماره ۲ شیب خط راست هر دو نمودار فشار و مشتق فشار در زمان‌های اولیه برابر ۰/۵ است که نشان‌دهنده شکافدار بودن و با توجه به انحراف آن جریان شکاف به صورت یکنواخت است. مدل مخزن انتخاب شده برای چاه شماره ۱ با توجه به انحراف U شکل ایجاد شده به شکل فروافتادگی کوچک، مدل تخلخل دوگانه که همان مخزن شکافدار طبیعی است انتخاب شد که همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار مشتق فشار و مقدار شیب خط راست در نمودار نیمه لگاریتمی نصف مقدار مشتق فشار در جریان نهایی است که باز دلیل بر انتخاب این مدل است. برای چاه شماره ۲ مدل مخزن همگن که تراوایی، تخلخل و ضخامت در تمام قسمت‌های مخزن یکسان و تغییرات نمودار مشتق فشار ثابت است انتخاب شد.

ناحیه زمان نهایی[2]: شامل اطلاعات فشاری مربوط به مرزهای مخزن است و نوع مرزها را مشخص می‌کند [۲۲]. با توجه به نمودار مشتق فشار حاصل شده برای هر دو چاه، چون انتهای نمودار مشتق فشار تقریبا به صورت افقی شده است مدل مورد نظر به صورت نامحدود انتخاب شد.

پارامترهای چاه و مخزن حاصل شده بعد از تفسیر داده‌ها و انتخاب مدل مناسب

پارامترها و اطلاعاتی که در این تفسیر حاصل شد در جدول ۴ ارائه گردیده است. مهم‌ترین پارامترهای مخزنی همچون تراوایی که قابلیت محیط متخلخل برای عبور سیال از میان خود است، ضریب پوسته که نشان دهنده وجود یا عدم وجود آسیب‌سازندی[3] و یا مانع بر سر راه تولید است و اثر ذخیره چاه که مفهوم تاخیر زمانی بین جریان تولیدی که اعمال می‌شود و جریانی که در سطح مشاهده می‌شود، حاصل شدند.

آنالیز فشار گذرا با استفاده از داده‌های فشاری پایش شده آزمایش ساق مته در میدان مورد بررسی

داده‌های فشاری پایش شده توسط گیج‌های فشاری در هنگام آزمایش ساق مته را وارد نرم افزار سفیر کرده و مورد آنالیز قرار دادیم. مراحل تفسیر و آنالیز همانند تفسیر داده‌های پمپ ESP است با این تفاوت که داده‌های آزمایش ساق مته نشان‌دهنده داده‌های فشار جریان ته‌چاهی بوده به همین منظور وضوح و روند تغییرات نمودارهای فشار و مشتق فشار بهتر است و مدل چاه و مخزن انتخاب شده در قسمت ۲-۴ را به خوبی نشان می‌دهد. نتایج تفسیر داده‌ها برای دو چاه میدان مورد بررسی در جدول ۵ و در شکل‌های ۷ و ۸ ارائه شده است.

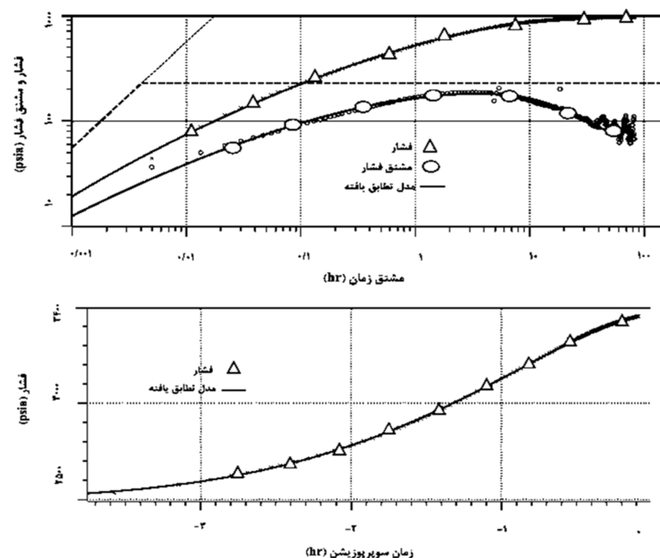
1. Middle Time Region (MTR)
2. Late Time Region (LTR)
3. Formation Damage

جدول ۴ پارامترهای مخزنی حاصل شده در نتیجه آنالیز داده‌های پمپ ESP.

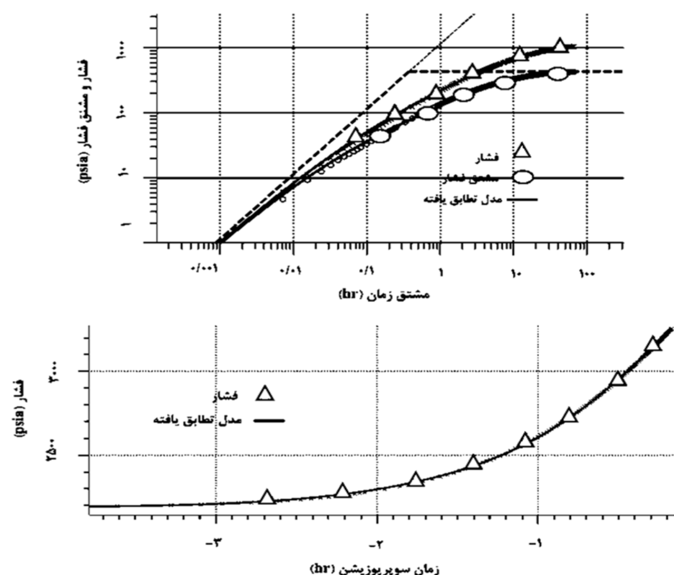
اثر ذخیره چاه (bbl/psi)	ضریب پوسته	تراوایی (md)	اطلاعات
۰/۰۰۰۰۳۲۲	-۲/۹	۰/۲۳	چاه شماره ۱
۰/۰۳۸	-۰/۰۰۱۹	۱/۹	چاه شماره ۲

جدول ۵ مدل چاه و مخزن و پارامترهای مخزنی حاصل شده در نتیجه آنالیز داده‌های آزمایش ساق مته.

اثر ذخیره چاه (bbl/psi)	ضریب پوسته	تراوایی (md)	مدل مرز مخزن	مدل مخزن	مدل چاه	مدل ناحیه دهانه چاه	اطلاعات
۰/۰۰۰۰۳۱۳	-۲/۷	۰/۲۳۵	نامحدود	مخزن تخلخل دوگانه	چاه عمودی	اثر ذخیره چاه ثابت	چاه شماره ۱
۰/۰۴	-۰/۰۰۲	۱/۸۷	نامحدود	مخزن همگن	چاه شکافدار- با جریان یکنواخت	اثر ذخیره چاه ثابت	چاه شماره ۲



شکل ۷ نمودار مشتق فشار و فشار حاصل شده از داده‌های آزمایش ساق مته بعد از انتخاب مدل مناسب برای چاه شماره ۱.



شکل ۸ نمودار مشتق فشار و فشار حاصل شده از داده‌های آزمایش ساق مته بعد از انتخاب مدل مناسب برای چاه شماره ۲.

پژوهش نفت شماره ۱۲۶، آذر و دی ۱۴۰۱، صفحه ۱۲۵-۱۱۰

اطلاعات مفید حاصل شده از تفسیر داده‌ها و چاه‌آزمایی

انجام عملیات چاه‌آزمایی و تفسیر داده‌های حاصل از آن در مراحل مختلف عمر چاه و مخزن هیدروکربوری شامل اکتشاف، ارزیابی، توسعه، توصیف مخزن و مهندسی بهره‌برداری، نقش مهمی ایفا می‌کند. یکی از محاسن بزرگ چاه‌آزمایی نسبت به سایر روش‌های اخذ داده از مخزن، میزان شعاع ارزیابی بیشتر آن می‌باشد. با بررسی داده‌های پایش شده پمپ ESP و داده‌های DST، اطلاعات مفید دیگری از رفتار دینامیک چاه و مخزن برای دو چاه میدان مورد بررسی حاصل گردید.

در فاز اکتشاف و ارزیابی

۱- آیا مخزن توان لازم برای تولید را دارد که به‌توان بر اساس آن قراردادی بلند مدت برای بهره‌برداری امضا کرد؟

با برآورد قابلیت انتقال‌پذیری[1] که از حاصل ضرب تراوایی در ناحیه بهره‌ده (kh) حاصل می‌شود، می‌توان توان تولید را مقایسه کرد [۲۰]. در اینجا برای چاه شماره ۱ مقدار (md.ft) ۱۳/۱ تا ۱۳/۴ و برای چاه شماره ۲ مقدار (md.ft) ۲۱۷/۱ تا ۲۱۹/۹ به‌دست آمد که نتیجه می‌شود قابلیت انتقال‌پذیری سیال هیدروکربوری و توان تولیدی چاه شماره ۲ بهتر است.

در فاز مهندسی مخزن

۱- محدوده تغییرات تراوایی مخزن در چه حدود است؟

تراوایی از داده‌های مهم در مهندسی مخازن است که برای شبیه‌سازی مخزن و همچنین پیش‌بینی تولید و تخمین هر چه دقیق‌تر آن ضروریست [۲۲]. همان‌طور که از نتایج مشخص است میزان تراوایی چاه شماره ۱ در حدود ۰/۲۳ و برای چاه شماره ۲ در حدود ۱/۹ برآورد شده است که نشان می‌دهد میزان عبوردهی سیال از محیط متخلخل برای چاه شماره ۲ بهتر است.

۲- فشار متوسط مخزن چه مقدار است؟

از فشار متوسط مخزن برای عملیات شبیه‌سازی مخزن، بهینه‌سازی چاه می‌توان بهره برد. بعد از تفسیر و آنالیز داده‌ها، بر اساس پارامترهای مخزنی همچون شعاع ناحیه تخلیه، ضخامت مخزن، فشار اولیه و تخلخل و محاسبات موازنه مواد، مقدار فشار متوسط مخزن را برآورد می‌کنند [۲۰]. برای چاه شماره ۱ مقدار (psi) ۴۳۶۱/۶۶ و برای چاه شماره ۲ مقدار (psi) ۵۰۹۵/۱۷ حاصل شدند.

در فاز مهندسی بهره‌برداری

۱- آیا چاه آسیب دیده است؟ عملیات تحریک چاه تا چه حد مؤثر بوده است؟

همان‌طور که اشاره کردیم یکی از پارامترهای مهم که از چاه‌آزمایی حاصل می‌شود ضریب پوسته است که نشان می‌دهد آیا چاه دچار آسیب شده است یا نه. وقتی علامت s مثبت باشد نشان از آسیب سازندی، وقتی علامت s منفی باشد نشان از این است که چاه مورد عملیات تحریک‌سازی و بهبود تولید قرار گرفته است تا مانع تولید و آسیب برطرف شود و اگر مقدار s صفر باشد نشان از عدم وجود آسیب است [۲۰ و ۲۲]. با توجه به نتایج آنالیز چاه‌آزمایی، چاه شماره ۱ ضریب پوسته‌ای در حدود ۲/۷- تا ۲/۹- داشته که با توجه به مدل انتخاب شده نیز این میزان معقول است چراکه یکی از راه‌های تحریک‌سازی چاه ایجاد شکاف به منظور دور زدن و یا برطرف کردن ناحیه آسیب دیده است و برای چاه شماره ۲ مقداری در حدود ۰/۰۰۱۹- تا ۰/۰۰۲- حاصل شده که نشان از آسیب سازندی بسیار محدود نزدیک صفر است.

۲- شاخص بهره‌دهی و حداکثر میزان تولید مخزن در چه محدوده‌ای قرار دارد؟

قابلیت دهش مخزن[1] یکی از فاکتورهای تاثیرگذار بر تولید چاه است که تعیین می‌کند چه نوع تکمیل چاهی استفاده شود و یا کدام روش تولید مصنوعی در چاه به کار گرفته شود. با به‌کارگیری رابطه

1. Transmissibility
2. Stimulation
3. Reservoir Deliveribility

عملکرد جریانی می‌توان قابلیت دهش را پیش‌بینی کرد. منحنی رابطه عملکرد جریانی[1] نشان دهنده فشار جریانی ته چاه بر حسب نرخ تولید برای هر چاه می‌باشد. مقدار عددی منفی معکوس شیب این نمودارها معرف شاخص بهره‌دهی[2] مخزن است که هر چقدر بیشتر باشد میزان بهره‌دهی چاه بیشتر خواهد بود [۲۰]. با داشتن شاخص بهره‌دهی می‌توان حداکثر جریان آزاد مطلق[3] تولیدی یک چاه را برآورد کرد. رابطه ۱ (رابطه وُگِل) نمایانگر رابطه عملکرد جریانی مخازن نفت و گازی است [۲۳]:

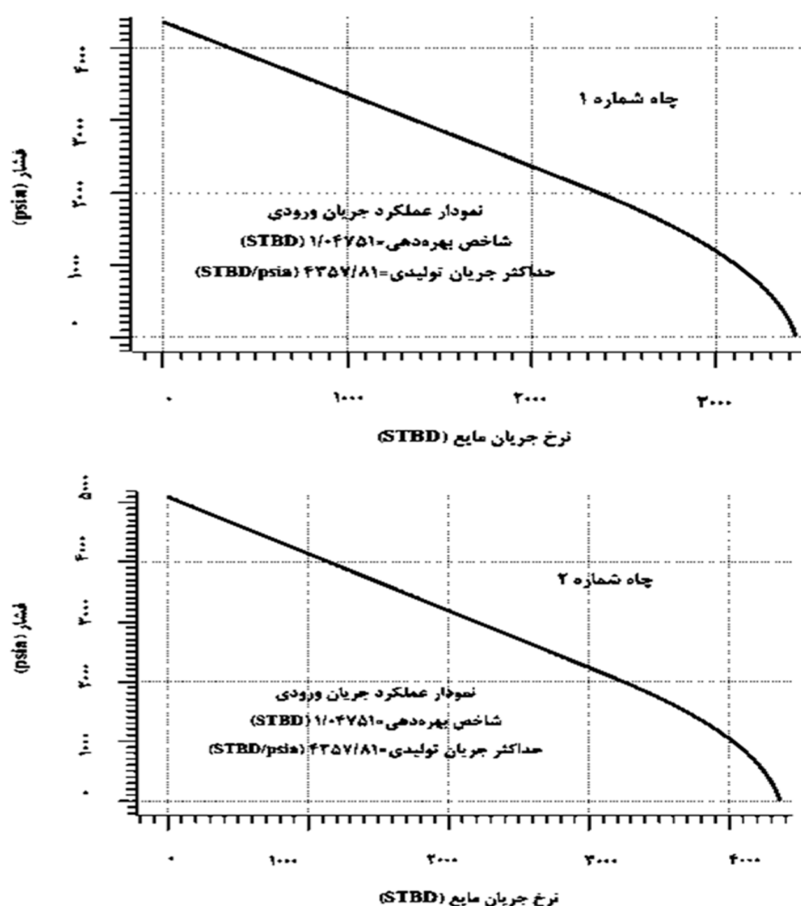
$$PI\ \ or J=\frac{Q}{P_R-P_{wf}}Q=Q_{ob}+\frac{JP_b}{1.8}(1-0.2\frac{P_{wf}}{P_b}-0.8(\frac{P_{wf}}{P_b})^2),$$

$$Q_{ob}=J(P_R-P_b),Q_{Max}=AOF=Q_{ob}+\frac{JP_b}{1.8} \qquad (۱)$$

PI یا J= شاخص بهره‌دهی Q=دبی تولیدی P_R= فشار میانگین مخزن P_{wf}= فشار جریان ته‌چاهی P_b=فشار نقطه حباب

Q_{ob}= جریان تولیدی در نقطه حباب Q_{Max} یا A_{OF}= حداکثر جریان تولیدی

برای چاه شماره ۱ شاخص بهره‌دهی مقدار (ST-B/D/psi) ۱/۰۰۲ و حداکثر جریان تولیدی (STB/D) ۳۴۳۳/۵۲ و برای چاه شماره ۲ شاخص بهره‌دهی مقدار (STB/D/psi) ۱/۰۴۷ و حداکثر جریان تولیدی (STB/D) ۴۳۵۷/۸۱ به‌دست آمد. رابطه عملکرد جریانی حاصل شده برای این دو چاه در شکل ۹ ارائه شده است.



شکل ۹ نمودار رابطه عملکرد جریانی برای دو چاه میدان مورد بررسی.

1. Inflow Performance Relationship (IPR)
2. Productivity Index (PI) or J
3. Absolute Open Flow

بحث و نتایج

خلاصه‌ای از پژوهش انجام گرفته در مقاله در شکل ۱۰ ارائه گردیده است.

در این مطالعه موردی نتایج زیر حاصل گردید:

۱- با آنالیز داده‌های پایش شده توسط پمپ شناور الکتریکی به کمک علم چاه‌آزمایی بررسی شد که می‌توان به خوبی رفتار دینامیک مخازن واقعی را مورد ارزیابی قرار داد و پارامترهای مهم مخزنی همچون تراوایی و ضریب پوسته را یافت.

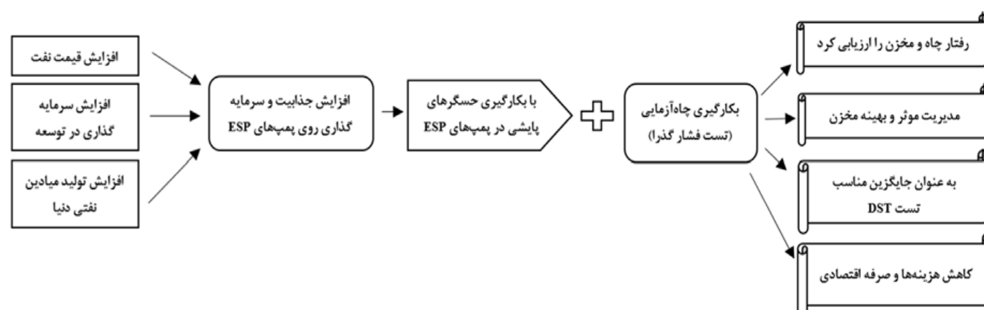
۲- در جدول ۶ مقایسه پارامترهای مخزنی حاصل از آنالیز داده‌های پمپ شناور الکتریکی و آزمایش ساق مته ارائه گردیده است که همان‌طور که مشاهده می‌شود درصد اختلاف ناچیز بوده و تطابق بسیار خوبی حاصل شده است.

با در نظر گرفتن داده‌های حاصل از آزمایش ساق مته به عنوان داده‌های واقعی و داده‌های حاصل از آزمایش پمپ ESP به عنوان داده‌های تجربی، درصد اختلاف برای هر پارامتر به صورت زیر محاسبه گردید:

$$\text{درصد اختلاف} = \frac{|\text{داده}_{DST} - \text{داده}_{ESP}|}{|\text{داده}_{DST}|} * ۱۰۰ \qquad (۲)$$

این درصد اختلاف مشاهده شده نیز می‌تواند ناشی از اختلاف فشار جریان ته‌چاهی با فشار ورودی پمپ باشد. برای چاه شماره ۱ مقدار فشار جریان ته‌چاهی psi ۱۹۶۰/۵ و فشار ورودی پمپ psi ۱۹۷۲/۱ و برای چاه شماره ۲ مقدار فشار جریان ته‌چاهی psi ۲۱۵۳/۶ و فشار ورودی پمپ psi ۲۱۶۳/۷ که همان‌طور که مشاهده می‌شود، اختلاف فشاری در حدود psi ۱۰تا ۱۲ وجود خواهد داشت. پس می‌توان نتیجه گرفت درصد اختلاف کمتر چاه شماره ۲ نسبت به چاه شماره ۱ ناشی از کمتر بودن اختلاف فشار است.

۳- با مقایسه اطلاعات مفید حاصل شده از تفسیر داده‌ها و چاه‌آزمایی در فازهای مختلف دیده شد که چاه شماره ۲ قابلیت انتقال‌پذیری، قابلیت عبوردهی سیالات از محیط متخلخل (تراوایی) و شاخص بهره‌دهی بهتری نسبت به چاه شماره ۱ دارا بوده و آسیب‌سازندی کمتر و حداکثر جریان تولیدی بیشتری نسبت به چاه شماره ۱ را دارا می‌باشد. خلاصه این نتایج برای دو چاه در جدول ۷ ارائه گردیده است.



شکل ۱۰ خلاصه‌ای از مطالعه و پژوهش انجام گرفته در مقاله.

جدول ۶ مقایسه نتایج آنالیز فشار گذرای داده‌های پمپ ESP و آزمایش ساق مته.

اطلاعات	آزمایش ساق مته		آزمایش پمپ شناور الکتریکی		درصد اختلاف*	
	چاه شماره ۱	چاه شماره ۲	چاه شماره ۱	چاه شماره ۲	چاه شماره ۱	چاه شماره ۲
تراوایی (md)	۰/۲۳۵	۱/۸۷	۰/۲۳	۱/۹	٪۲/۱۲	٪۱/۶
ضریب پوسته	-۲/۷	-۰/۰۰۲	-۲/۹	-۰/۰۰۱۹	٪۷/۴	٪۵
اثر ذخیره چاه (bbl/psi)	۰/۰۰۰۰۳۱۳	۰/۰۴	۰/۰۰۰۰۳۲۲	۰/۰۳۸	٪۲/۸۷	٪۵

جدول ۷ مقایسه اطلاعات مفید حاصل شده از تفسیر داده‌ها و چاه‌آزمایی برای دو چاه میدان مورد بررسی در فازهای مختلف مهندسی نفت.

حداکثر جریان تولیدی (STB/D)	شاخص بهره‌دهی (STB/D/psi)	فشار متوسط مخزن (psi)	قابلیت انتقال‌پذیری (md.ft)	اطلاعات
۳۴۳۳/۵۲	۱/۰۰۲	۴۳۶۱/۶۶	۱۳/۱ تا ۱۳/۴	چاه شماره ۱
۴۳۵۷/۸۱	۱/۰۴۷	۵۰۹۵/۱۷	۲۱۷/۱ تا ۲۱۹/۹	چاه شماره ۲

۴- طبق برآورد هزینه‌ای که از بازارهای جهانی کسب کردیم، هزینه تجهیزات آزمایش ساق مته چیزی در حدود قیمت چند هزار تا حدود چند میلیون دلار می‌تواند تخمین زده شود که این رنج بسته به نوع کیفیت تجهیزات، کارایی، دوام و شرایط مختلف چاه و مخزن متغیر است. این در حالی است که هزینه حضور دکل حفاری چیزی در حدود چندین برابر این رقم برآورد شده است. به این مبالغ می‌بایست هزینه‌های حسگرهای استفاده شده، شیرها، پکرها، کارگران و افراد ناظر، سیال حفاری که در هنگام انجام آزمایش استفاده می‌شود، مدت زمانی که صرف انجام آزمایش می‌شود و طی آن چاه باید بسته شده و تولید قطع می‌شود و غیره اشاره کرد [۲۸]. این موضوع خود گویای اهمیت بکارگیری داده‌های پایش شده پمپ ESP را نشان می‌دهد چراکه به عبارتی هم می‌توان از این پمپ‌ها در امر فرازآوری و حفظ و نگهداشت چاه بهره برد هم با آنالیز فشارگذرای چاه و مخزن حاصل از داده‌های پایش شده توسط حسگرهای این پمپ‌ها به مدیریت موثر مخزن پرداخت و در هزینه‌های حضور دکل و تجهیزات و زمان صرفه‌جویی کرد.

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج چاه‌آزمایی حاصل از داده‌های پایش شده پمپ شناور الکتریکی و آزمایش ساق مته که برای دو چاه یکی از میادین جنوب غربی ایران مورد بررسی قرار گرفتند، می‌توان نتیجه گرفت که با بکارگیری حسگرهای پایشی در پمپ‌های شناور الکتریکی و آنالیز داده‌های پایش شده پمپ، به خوبی شرایط چاه و مخزن مورد بررسی قرار خواهد گرفت و با توجه به درصد اختلاف ناچیز حاصل شده از مقایسه پارامترهای مخزنی دو آزمایش و اعتبارسنجی بسیار خوب حاصل شده در مقایسه با آزمایش ساق مته می‌توان نتیجه گرفت که روش ارائه شده در این مقاله می‌تواند به عنوان روشی نوین و چاه‌آزمایی محور در چاه‌هایی که به منظور امر فرازآوری مصنوعی و حفظ و نگهداشت تولید به پمپ‌های شناور الکتریکی مجهز شده‌اند، به‌کار گرفته شود و در هزینه‌های حضور دکل و تجهیزات صرفه‌جویی و مخزن به شیوه‌ای موثرانه مدیریت شود.

در این مطالعه موردی با بررسی و آنالیز داده‌های فشار گذرای پایش شده دو مورد از چاه‌های یکی از میادین جنوب غربی ایران مشاهده گردید چاه شماره ۲ قابلیت انتقال‌پذیری، قابلیت عبوردهی سیالات از محیط متخلخل (تراوایی) و شاخص بهره‌دهی بهتری نسبت به چاه شماره ۱ دارا بوده و آسیب سازندی کمتر و حداکثر جریان تولیدی بیشتری نسبت به چاه شماره ۱ را دارا می‌باشد و درصد اختلاف کمتری بین نتایج داده‌های آنالیز شده پمپ ESP با آزمایش DST برای این چاه مشاهده گردید چراکه اختلاف فشاری کمتری بین فشار جریان ته‌چاهی با فشار ورودی پمپ برای این چاه حکم فرما بود.

پژوهش نفت شماره ۱۲۶، آذر و دی ۱۴۰۱، صفحه ۱۲۵-۱۱۰

مراجع

[1]. Biondi B, Mavko G, Mukerji T, Rickett J, Lumley D, Deutsch C, Thiele M (1998) Reservoir monitoring: A multidisciplinary feasibility study, The Leading Edge, 17, 10: 1404-1414.
[2]. Al-Mubarak S M (2008) Real-time reservoir management from data acquisition through implementation: closed-loop approach, Intelligent Energy Conference and Exhibition, OnePetro.
[3]. Djuraev U, Jufar S R, Vasant P (2017) A review on conceptual and practical oil and gas reservoir monitoring methods, Journal of Petroleum Science and Engineering, 152: 586-601.
[4]. Smith R G, Maitland G C (1998) The road ahead to real-time oil and gas reservoir management, Chemical Engineering Research and Design, 76, 5: 539-552.
[5]. Chorneyko D M (2006) Real-time reservoir surveillance utilizing permanent downhole pressures-an operator's experience, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, OnePetro.
[6]. Gringarten Alain C (1998) Evolution of reservoir management techniques: From independent methods to an integrated methodology, Impact on petroleum engineering curriculum, graduate teaching and competitive advantage of oil companies, SPE Asia Pacific Conference on Integrated Modelling for Asset Management, Society of Petroleum Engineers.
[7]. Rafiei Y (2016) Real-time well and reservoir management by intelligent well technology, Conference: Petroleum Engineering seminar at Petroleum and Chemical Engineering department of American University of Beirut.
.
[8]. Al-Buraikan M M, Al-Hashim H S, Issaka M B, Al-Yousef H Y (2013) Pressure transient analysis of data from permanent downhole gauges, SPE Digital Energy Conference. OnePetro.
[۹]. خامه‌چـی ا، قاسـمی م، کاشـی م (سـال ۱۳۹۸) تخمیـن دقیـق پارامترهـای چاه‌آزمایـی بـا اسـتفاده از یـک الگوریتـم ترکیبـی و مقایسـه آن بـا یـک نرم‌افـزار رایـج صنعتـی، پژوهـش نفـت، ۹۸، ۲۹-۲: ۴۰-۲۸.
[10]. Kuchuk F J, Onur M, Hollaender F (2010). Pressure transient formation and well testing: convolution, deconvolution and nonlinear estimation, Elsevier.
[11]. Black W M (1956) A review of drill-stem testing techniques and analysis, Journal of Petroleum Technology, 8, 06: 21-30.
[12]. Zhu J, Guo X, Liang F, Zhang H Q (2017) Experimental study and mechanistic modeling of pressure surging in electrical submersible pump, Journal of Natural Gas Science and Engineering, 45, 625-636.
[13]. El Mahbes R, Manfoumbi W, Kadio-Morokro B (2018) Real-time remote monitoring to enhance electrical submersible pump system run life and maximize production, SPE Middle East Artificial Lift Conference and Exhibition, OnePetro.
[14]. Liang X, Ghoreishi O, Xu W (2016) Downhole tool design for conditional monitoring of electrical submersible motors in oil field facilities, IEEE Transactions on Industry Applications, 53, 3: 3164-3174.
[15]. Al-Khaldi H A, Al-Obathani O H, Anisur Rahman N M (2017) A thorough investigation into the transient-pressure data from horizontal oil wells equipped with electrical submersible pumps, SPE Kingdom of Saudi Arabia Annual Technical Symposium and Exhibition, Society of Petroleum Engineers.
[16]. Camilleri L, Al-Hussainee N, Al-Janabi M, Al-Jorani M, Kamal Aal Najar M, Ayoub J (2022) Delivering pressure transient analysis during drawdown on ESP wells: case studies and lessons learned, SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference, OnePetro.
[17]. Al Qahtani A M, Al Qahtani M (2018) Adding more value in the downturn time from digital oil field; what is more to leverage?, SPE Kingdom of Saudi Arabia Annual Technical Symposium and Exhibition, OnePetro.
[18]. Liang X, Faried S O, Ilochonwu O (2010) Subsea cable applications in electrical submersible pump systems, IEEE Transactions on Industry Applications, 46, 2: 575-583.
[19]. Methodologies S, Lessons learned from heavy oil well testing with an ESP, Offshore UK in the Bentley Field, Block 9.
[۲۰]. شریفی م (۱۳۹۷) کتاب مبانی چاه‌آزمایی، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر. تهران.
[21]. Gholamzadeh Y, Sharifi M, Karkevandi-Talkhooncheh A, Moraveji M K (2020) A new physical modeling for two-phase wellbore storage due to phase redistribution, Journal of Petroleum Science and Engineering, 195, 107706.
[۲۲]. سلمانی ص، حاجی‌زاده ع، کرد ش (۱۳۹۸) کتاب مبانی چاه‌آزمایی کاربردی. اهواز، ترآوا، ۱۳-۳۹.
[23]. Wiggins M L, Russell J E, Jennings J W (1996) Analytical development of vogel-type inflow performance relationships, SPE Journal, 1, 04: 355-362.
[24]. Dosmukhambetov I, Taubayev B, Yesbolov U, Sadykov A, Shmalin M, Akbayev B, Khaziev B (2022) First

successful ESP-DST well test in heavy oil unconsolidated sandstone in Caspian Sea, SPE Conference at Oman Petroleum and Energy Show, OnePetro.
[25]. Dosmukhambetov I, Taubayev B, Yesbolov U, Sadykov A, Shmalin M, Akbayev B, Khaziev B (2020) Methodology for Exploration Well Testing with ESP-DST in Caspian Sea, the case study in unconsolidated sandstone with heavy oil, SPE Annual Caspian Technical Conference, OnePetro.
[26]. De Leonardis D, Shumakov Y, Morton K L, Sarac S (2017) ESP-DST well testing in a complex reservoir in the barents sea: Establishing new methodologies and lessons learned, SPE Bergen One Day Seminar, OnePetro.
[27]. Beck D, Shumakov Y, Hetherington G, Ovchinnikov V (2014) Unlocking future heavy oil development in the north sea: a well testing success in the kraken field, SPE/EAGE European Unconventional Resources Conference and Exhibition, European Association of Geoscientists and Engineers, 1.
[28]. Petrolum report, drill-stem-test-market-share (2022-2028) Regional trends, global size, industry growth, competitive landscape, pestle analysis, statistical model, and forecast, Nebreska University.

پژوهش نفت شماره ۱۲۶، آذر و دی ۱۴۰۱، صفحه ۱۳۶-۱۲۶

بررسی آزمایشگاهی افزایش پایداری فوم با استفاده از نانوذره، سورفکتانت و بیوپلیمر زانتان جهت افزایش برداشت نفت

روح‌الله هاشمی* و حمیدرضا صالحی
دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۱۹

چکیده

نیاز روزافزون جهانی سبب شده است که در بهره‌برداری از منابع تجدیدناپذیر به‌خصوص منابع نفتی، تلاش بر بهترین استفاده و بهره‌برداری باشد. تزریق گاز در میادین نفتی یکی از روش های متداول در صنعت بهره‌برداری از مخازن هیدروکربوری است. از گازهای متداول تزریق گاز در مخازن، گاز دی اکسید کربن به‌دلیل نتایج خوب تزریق است. در تزریق گاز به مخازن مشکلاتی وجود دارد که از بارزترین آنها می‌توان به حرکت نامطلوب گاز در محیط متخلخل اشاره کرد. از دلایل حرکت نامطلوب گاز، چگالی و ویسکوزیته پایین گاز است. این عوامل سبب جدایش گرانشی و نیز پدیده انگشتی شدن می‌گردد. جایگزین کردن فوم به‌جای گاز یکی از راه‌کارهای کاهش مشکلات تزریق گاز است. سیلاب‌زنی نفت به‌وسیله فوم می‌تواند راندمان جاروبی بهتری نسبت به گاز داشته باشد. فوم ویسکوزیته ظاهری بالاتری نسبت به گاز دارد و در تزریق سبب کاهش پدیده انگشتی شدن خواهد شد. در این پژوهش، با استفاده از آب دیونیزه و در شرایط دمایی و فشاری اتمسفریک، در مرحله نخست توانایی فوم‌زایی محلول‌های طراحی شده مورد بررسی قرار گرفت. در غلظت بحرانی wt.٪ ۰/۲۴ از سورفکتنت، تأثیر انواع پارامترها بر میزان فوم‌زایی مورد بررسی قرار گرفت. علاوه‌بر این، پایداری این محلول ها براساس زمان نیمه عمر فوم مورد اندازه‌گیری قرار گرفت و پارامترهای بهینه محلول نهایی جهت تزریق به میکرومدل تعیین گردیدند. در انتها، محلول به‌دست آمده از پارامترهای بهینه جهت تزریق به میکرومدل انتخاب شده و میزان نفت تولیدی برای محلول‌های مختلف توسط آزمایش محاسبه گردید. نتایج این پژوهش نشان داد که حضور نانوذره سیلیکا نیمه عمر فوم را حدود ٪۲۵ افزایش داده و اگر پلیمر زانتان گام نیز به‌همراه نانوذره استفاده شود، این افزایش نیمه عمر به ٪۶۰ خواهد رسید. برای بررسی اثر تزریق فوم بهبود یافته با پلیمر زانتان گام و نانوذره سیلیکا از یک میکرومدل شیشه‌ای طراحی شده استفاده گردید. میزان نفت باقی‌مانده در میکرومدل در حالتی که از فوم بهبود یافته با پلیمر و نانوذره استفاده شد به حدود ٪۴/۴ کاهش پیدا کرد که علاوه‌بر تخلیه محیط متخلخل در زمان کوتاه‌تر، افزایش برداشت قابل توجهی نیز در مقایسه با حالت تزریق فوم بدون پلیمر مشاهده گردید.

کلمات کلیدی: ازدیاد برداشت، فوم‌زایی، دی اکسید کربن، پایداری فوم، زانتان، میکرومدل

---

*مسؤول مکاتبات
آدرس الکترونیکی rhashemi@iut.ac.ir
شناسه دیجیتال: (DOI:10.22078/PR.2022.4622.3180)

مقدمه

با توجه به پژوهش‌های اولیه و تلاش‌های موفقی که به‌طور گسترده برای افزایش بهبود بازیابی نفت انجام شده است، سیلاب‌زنی با گاز دی اکسید کربن برای بیش از شش دهه مورد مطالعه قرار گرفته است [۱ و ۲]. طبیعت پایدار شیمیایی و در دسترس بودن از نظر اقتصادی که از طریق منابع طبیعی به‌دست می‌آید باعث می‌شود تا از دی اکسید کربن به‌عنوان منبعی برای سیلاب‌زنی گاز کمک گرفته شود [۳]. مزیت استفاده از گاز این است که اگر با نفت مخلوط شود، می‌تواند راندمان بازیابی نفت از مخزن را بیشتر کند، اما هر روش مشکلاتی نیز دارد که از جمله مهم‌ترین مشکلات این روش می‌توان به تحرک‌پذیری نامطلوب به‌دلیل ویسکوزیته پایین گاز اشاره کرد که منجر به جدایش گرانشی و پدیده انگشتی شدن گاز می‌شود. برای مقابله با این مشکل، تزریق گاز دی اکسید کربن به‌صورت فوم در بسیاری از پژوهش ها مورد بررسی قرار گرفته است [۴ و ۵]. جریان فوم باعث بهبود کارآیی جاروبی با افزایش ویسکوزیته ظاهری گاز می‌شود. با افزایش ویسکوزیته گاز، پدیده انگشتی شدن و تأثیر گرانش کاهش می‌یابد. فوم می‌تواند بهبود راندمان جاروبی را با ایجاد مقاومت در برابر جریان در مناطق با نفوذپذیری بالا در یک ساختار ناهمگن افزایش دهد. فوم در ناحیه‌های با تراوایی بالا تولید شده و به دام می‌افتد که منجر به حرکت به نواحی با نفوذپذیری پایین می‌شود و به این ترتیب سبب بهبود کارآیی فرآیند می‌شود. علاوه‌بر استفاده از گاز به‌صورت فوم در حضور سورفکتنت، حضور پارامترهای مختلف به کاهش محدودیت‌های فوم‌ها کمک خواهد کرد که علاوه‌بر افزایش پایداری فوم، باعث بهبود عمر دینامیکی فوم‌ها نیز خواهد شد [۶]. پایداری فوم در محیط‌های متخلخل برای کاربردهای صنعتی مانند افزایش بازیافت نفت در مخازن هیدروکربوری بسیار حائز اهمیت است. در سال‌های اخیر، محققان از روش‌های مختلفی مانند فوم‌زایی و پایداری فوم با اندازه‌گیری میزان نیمه‌عمر در سرعت‌ها و غلظت‌های مختلف گاز سطحی استفاده کرده‌اند [۷ و ۸]. علاوه‌بر خصوصیات فیزیکی گاز، حضور نانوذرات با اصلاح سطحی نیز به‌عنوان عاملی پایدارکننده با حضور در ناحیه رابط گاز- مایع توسط محققان مورد بررسی قرار گرفته است. نانوذرات با خصوصیات بهبود یافته با ایجاد یک سد انرژی برای گاز باعث افزایش پایداری فوم خواهند شد [۹]. منجزی و همکاران دریافتند که نانوذرات سیلیکا اصلاح شده با استفاده از ۳-آمینو پروپیل تری اتوکسی سیلان (APTES) در مقایسه با سیلیکای اصلاح نشده، تأثیر بیشتری بر پایداری فوم دارند. علاوه‌بر این، نانوذرات اصلاح شده در محیط میکرومدل افزایش برداشت بیشتری از خود نشان دادند [۱۰]. از بررسی گسترده موجود در مورد فوم تثبیت شده با نانوذرات می‌توان نتیجه گرفت که حضور نانوذرات سیلیکا با آب‌گریزی متوسط و غلظت‌های مناسب در سطح مشترک پایدار بین سیالات غیرقابل اختلاط باعث افزایش قابل توجهی از نظر پایداری برای فوم خواهد شد [۱۱]. طبق بررسی‌های ژنگ و همکاران در مخازن نفتی با دما و شوری بالا، پایداری حرارتی ضعیف و تا حدودی تحمل شوری محلول پلی آکریل آمیدهای هیدرولیز شده (HPAM) مانع کارآیی آن در افزایش بازیافت نفت شده است. بنابراین، با اصلاح سطح نانو سیلیکا توسط اصلاح‌کننده‌های سیلانی هگزا متیل دی سیلازان (HMDS) و هگزادسیل تری‌متوکسی سیلان (HDTS) به‌طور جداگانه که به محلول پلی آکریل آمیدهای هیدرولیز شده اضافه شده، توانسته‌اند بازیابی نفت را تا ۱۰/۵۴٪ افزایش دهند [۱۲]. اگرچه در حضور نانوذرات کف دارای تثبیت بیشتری است، اما مخلوط نانوذرات و سورفکتانت به‌همراه پلیمر از نظر تولید فوم بسیار کارآمدتر است زیرا حضور این سه پایدارکننده در کنار هم باعث ایجاد یک هم‌افزایی برای دست‌یابی به کف

پژوهش نفت شماره ۱۲۶، آذر و دی ۱۴۰۱، صفحه ۱۳۶-۱۲۶

پایدارتر شده و کف حاصل دارای خصوصیات نیمه عمر بهتری خواهد بود. تانگ و همکاران با استفاده از یک کوپلیمر جدید اصلاح‌شده در حضور نانو سیلیکا توانستند بازیابی نفت را ۱۸/۷۴٪ در مقایسه با ۸/۱۲٪ بازیافت نفت را در هنگام استفاده از پلی آکریل آمید هیدرولیز شده افزایش دهند [۱۳]. بررسی‌های جیا بر پایداری فوم دی اکسیدکربن در حضور پلیمر و نانوذرات نشان داد که افزودن پلیمر باعث بالارفتن پایداری فوم گردیده و می‌تواند کفی پایدارتر جهت اهداف ازدیاد برداشت تولید نماید [۱۴]. حضور همزمان نانوذره به‌همراه پلیمر می‌تواند خصوصیات فیزیکی محلول تشکیل شده را به‌طور قابل توجهی افزایش دهد [۱۵]. به‌طور کلی، مطالعات کمی در حوزه بررسی میزان پایداری فوم در حضور همزمان نانوذره، سورفکتنت و بیو پلیمر وجود دارد. حضور پلیمر در ساختار سیال تزریقی به چند طریق می‌تواند در پایداری فوم موثر باشد. به‌عنوان دلیل اول، حضور پلیمر در ساختار فوم تزریقی به محیط متخلخل باعث افزایش ویسکوزیته ظاهری سیال می‌شود که خود این امر باعث افزایش زمان تخلیه مایع درون ساختار فوم شده و نتیجه نهایی پایداری بیشتر فوم در شبکه متخلخل است [۱۶ و ۱۷]. زیرا زمان تخلیه مایع رابطه عکس با ویسکوزیته فاز مایع دارد. به‌عنوان دلیل دوم این نکته را می‌توان ذکر کرد که حضور پلیمر در ساختار فوم بر رفتار جذبی سیال در روی محیط متخلخل تأثیرگذار خواهد بود [۱۸]. درصورت حضور پلیمر و جذب آن بر روی سطح محیط متخلخل یک اتصال قوی الکترواستاتیکی بین فوم و سطح جامد تشکیل شده و نتیجه آن تشکیل یک لاملای قدرتمند است که مقاومت بیشتری از خود در مقابل نیروهای مخرب خارجی جهت فروپاشی لاملا نشان می‌دهد [۱۹]. یکی از پلیمرهای بسیار خوب برای این هدف صمغ زانتان است که به همین علت در این پروژه استفاده شده است.

دلیل سوم برای استفاده از پلیمر این است که حضور پلیمر در ساختار فوم بر خصوصیات رفتاری سیال تزریقی بسیار تأثیر می‌گذارد که علت آن تشکیل یک شبکه‌ی پلیمری در ساختارلاملا است [۲۰]. همان‌طور که در مقالات اشاره شده است در صورت حضور پلیمر در ساختار فوم، حباب‌های بزرگ‌تری تشکیل خواهند شد. تشکیل حباب‌های بزرگ‌تر زمان ادغام حباب‌های تشکیل شده را کاهش داده و به نسبت پایداری حباب‌های تشکیل شده را افزایش می‌دهد. دلیل چهارم افزایش ضخامت لایه لاملا در اثر حضور پلیمراست که نفوذ گاز را از درون لاملا سخت‌تر خواهد کرد [۲۱]. مکانیسم نهایی برای افزایش پایداری فوم در حضور پلیمر این است که حضور پلیمر در ساختار سیال تزریقی مقاومت فوم را در برابرعوامل مخرب فوم بیشتر خواهد کرد. عواملی مانند شوری، ساختار نفت و جذب سورفکتانت بر محیط متخلخل در حضور پلیمر دارای اثر کمتری است [۲۲]. هدف از این پژوهش بررسی عملکرد فوم دی اکسید کربن با ترکیبی از سورفکتانت، نانوذرات و بیو پلیمر زانتان است. علاوه‌بر انجام آزمایش‌های استاتیک، محلول‌ها به یک میکرومدل جهت انجام آزمایشات دینامیک تزریق شدند و میزان بازیابی نفت در یک محیط متخلخل بررسی شد.

مواد و روش آزمایشگاهی

مواد آزمایشگاهی

سورفکتانت مورد استفاده در این پژوهش، سدیم دودسیل سولفات[1] شرکت تتراکم[2] که با نام اختصاری SDS شناخته می‌شود. نانوذره مورد استفاده، نانوذره سیلیکا آمورف جهت افزایش پایداری فوم است. مشخصات این نانوذره در جدول ۱ بیوپلیمر مورد استفاده در پژوهش صمغ زانتان[3] است

1. Sodiom Dodecyl Sulfate
2. Tetrachem
3. Xanthan Gum

جدول ۱ مشخصات نانوذره سیلیکا

نانوذره	اندازه ذرات (nm)	خلوص	شرکت سازنده
SiO_2	۳۰-۲۰	> ۹۸ ٪	US Research Nanomaterials

فرمول مولکولی این پلیمر $C_{35}H_{49}O_{29}$ است. این پلیمر دارای وزن مولکولی ۹۳۳/۷۴۸ گرم بر مول و چگالی ۱/۵ گرم بر سانتی متر مکعب است. در آزمون‌های تزریق در میکرومدل و همچنین در آزمون‌های پایداری، از نفت ورودی پالایشگاه اصفهان استفاده شده است. جدول ۲، مشخصات نفت مورد استفاده برای آزمایشات میکرومدل را نشان می‌دهد. در تمامی آزمایش‌ها، آب دوبار تقطیر استفاده شده است.

دستگاه‌های آزمایشگاهی

تجهیزات مورد استفاده در این پژوهش عبارتند از ترازوی دیجیتالی، همزن مغناطیسی، استوانه مدرج درپوش‌دار، اسپارژر پارچه‌ای، دستگاه کنترل‌کننده دبی گاز، دستگاه اولتراسونیک، سانتریفیوژ، دوربین، منبع نور، میکروسکوپ دیجیتالی، میکرومدل شیشه‌ای، کوره و پمپ.

روش آزمایش

در ابتدای آزمایشات، قابلیت فومزایی محلول دارای سورفکتنت انجام گرفت. روش کار بدین صورت است که ابتدا ۴ mL از محلول را در یک لوله آزمایش دارای درپوش ریخته و با تکان دادن لوله به‌مدت چند ثانیه ارتفاع کف تشکیل شده درون لوله را ثبت و این عدد را به‌عنوان قابلیت فومزایی محلول گزارش می‌کنیم. در مرحله بعد، برای هر یک از محلول‌های مولد فوم (با مواد متفاوت و یا غلظت‌های متفاوت) آزمون پایداری صورت گرفت. طبق شکل ۱ آزمون پایداری به این صورت است که ۵۰ mL از محلول مولد فوم را درون استوانه مدرج ۲۵۰ mL ریخته، سپس اسپارژر را در داخل محلول در انتهای استوانه مدرج قرار داده سپس با دستگاه کنترل کننده دبی گاز، دبی گاز را کنترل و به محلول تزریق کرده‌ایم. بعد از وارد شدن گاز به محلول، گاز به‌صورت حباب‌های ریز در محلول پخش شده است. بعد از رسیدن حباب به سطح محلول، به‌علت جذب سورفکتانت در اطراف این حباب‌ها، فوم تشکیل خواهد شد. به منظور بررسی و مقایسه فوم‌ها با یکدیگر، شاخص نیمه‌عمر فوم به‌عنوان مقیاس در نظر گرفته شده است.

در انتهای آزمایشات با استفاده از یک میکرومدل، فوم بهینه شده در شرایط مختلف جهت بررسی تأثیر آن بر میزان ازدیاد برداشت نفت از محیط متخلخل مورد بررسی قرار گرفت. روش کار بدین صورت است که در ابتدا میکرومدل را نفت دوست کرده و سپس با نفت پالایشگاه اصفهان اشباع می‌شود. برای تولید فوم تزریقی، با تزریق گاز از طریق اسپارژر به درون محلول مولد فوم، فوم را تشکیل داده و سپس از طریق مسیر خروجی دیگری که در محفظه تولید فوم تعبیه شده است، فوم به میکرومدل تزریق می‌شود. لازم به ذکر است که شرایط آزمایشگاهی برای تمام تست‌ها در دما و فشار اتمسفریک بوده و دبی تزریق فوم برای همه حالت‌ها ۲۰ mL/min در نظر گرفته شده است. با استفاده از یک دوربین از روند تزریق و ازدیاد برداشت عکس‌برداری نموده و با استفاده از برنامه ImageJ، هر کدام از عکس‌ها را آنالیز کرده و در نهایت میزان نفت استخراج شده را در هر کدام از تزریق‌ها به‌دست آورده و سپس با یکدیگر مقایسه کرده‌ایم.

نتایج

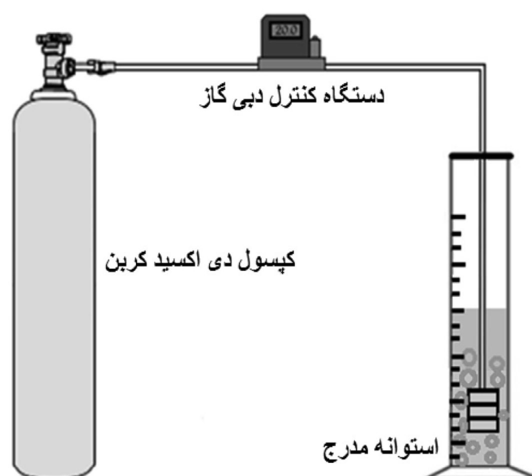
آزمون فومزایی

در شکل ۲ نتایج حاصل از آزمون فومزایی در غلظت‌های مختلف مشاهده می‌شود.

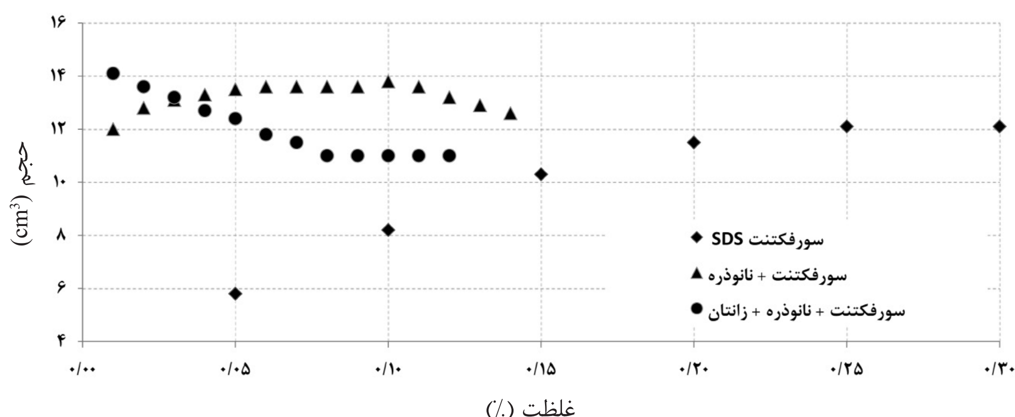
پژوهش نفت شماره ۱۲۶، آذر و دی ۱۴۰۱، صفحه ۱۳۶-۱۲۶

جدول ۲ مشخصات نفت مورد استفاده در تست‌ها جهت اشباع‌سازی

آسفالتین (%.wt)	عدد اسیدی (mgKOH/gOil)	ویسکوزیته (cP)	چگالی (g/cm^3)
۰/۴	۰/۱	۷/۳۴۲	۰/۸۴۱



شکل ۱ شماتیک کلی دستگاه آزمون پایداری.



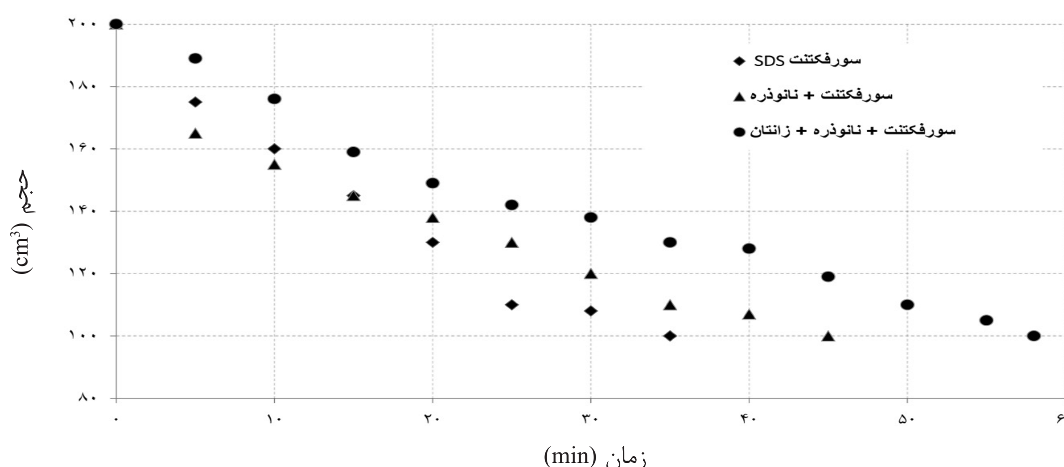
شکل ۲ توانایی فوم‌زایی محلول در اثر تغییر عوامل مختلف.

در این نمودار، نتایج حاصل از تغییر غلظت سورفکتنت، سورفکتنت به‌همراه نانوذره و همچنین تأثیر هم‌زمان حضور سه عامل پایدارکننده مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به نمودار شکل برای تأثیر غلظت سورفکتنت، می‌توان دریافت که با افزایش غلظت سورفکتانت تا حدود ۰/۲۵٪ ، میزان حجم تولیدی فوم افزایش می‌یابد و بالاتر رفتن غلظت از این مقدار، تأثیری در افزایش فوم ندارد. با افزایش غلظت بالاتر از این غلظت بحرانی (۰/۲۵ ٪)، فقط غلظت مایسل‌ها افزایش می‌یابد و تأثیری در تعداد مونومرها ندارد و بنابراین این غلظت به‌عنوان غلظت بهینه مورد استفاده در موارد بعدی به‌کار گرفته شده است. علاوه‌بر این در غلظت بالاتر از غلظت بحرانی با تشکیل لایه دوگانه، سورفکتنت‌ها عملاً تمایلی به قرارگیری در سطح میان دو فاز نداشته و تأثیر چندانی بر پایداری فوم ندارند. در مورد نانوذره مورد استفاده این نکته قابل توجه است که محلول نانوذره به‌تنهایی قادر به تولید فوم نیست.

برای غلظت‌های متفاوت از نانوذره سیلیکا، در غلظت بحرانی که برای سورفکتانت به‌دست آمده، آزمون قابلیت فوم‌زایی انجام شد. نمودار مثلثی در شکل ۲ نتایج حاصل از فوم‌زایی محلول با تغییر غلظت نانوذره سیلیکا را نشان می‌دهد. بر طبق نتایج به‌دست آمده، در غلظت‌های بالاتر از ۰/۱۱٪ از نانوذره در محلول، میزان فوم تولید شده کاهش می‌یابد. از دلایل بالارفتن پایداری فوم با افزایش نانوذره، بالارفتن ویسکوزیته مایع و در نهایت بالا رفتن ویسکوزیته لاملا است. علاوه‌بر این، افزایش تجمع نانوذره در لایه‌های میانی باعث ایجاد یک مانع محکم‌تر شده که عملاً خروج گاز را سخت‌تر خواهد کرد. در ویسکوزیته بالاتر، ورود گاز به درون لاملا سخت‌تر شده و به همین دلیل حباب‌ها پایدارتر خواهند بود. اضافه کردن ذرات نانو تا غلظت ۰/۱۱٪ در حضور سورفکتانت باعث می‌شود که میزان خروج سیال از درون لاملا کاهش پیدا کرده و بنابراین یک فوم قوی‌تری تشکیل شود. ولی با بالاتر رفتن غلظت نانوذره از مقدار ۰/۱۱٪ ، حضور نانوذره در ساختار فوم اثر مثبتی نداشته و قابلیت فوم‌زایی را کاهش می‌دهد. دلیل این امر افزایش غلظت نانوذرات در لایه میانی بوده و تجمع این ذرات باعث بهم پیوستگی نانوذرات شده و فصل مشترک مایع -گاز از این ذرات اشباع می‌شود. در نتیجه این اشباع، فشار مویینگی بیشینه بهم پیوستن حباب‌ها کاهش پیدا کرده و حباب‌ها زودتر دچار ترکیدگی می‌شوند. بنابراین اثر معکوسی بر فوم‌زایی دارند. نمودار دایره‌ای در شکل ۲، اثر همزمان سورفکتانت، نانوذره و صمغ زانتان را بر فوم‌زایی نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود بالاترین مقدار فوم‌زایی در غلظت ۰/۰۱٪ از پلیمر بوده و افزایش غلظت پلیمر اثر معکوس بر فوم‌زایی دارد. صمغ زانتان از بیوپلیمرهای ساکاریدی است که به‌دلیل ساختار قوی مولکولی و گرانروی بالاتر توانسته به‌عنوان عاملی جهت افزایش فوم‌زایی مورد استفاده قرار گیرد. با این حال در نمودار دیده می‌شود که افزایش غلظت وزنی باعث کاهش فوم‌زایی در حضور صمغ زانتان شده که دلیل آن می‌تواند برهم‌کنش پیچیده مولکولی در لایه میانی و افزایش ویسکوزیته بالا در لاملا باشدکه مانع از فوم‌زایی خواهد شد [۱۳]. این نمودار نشان می‌دهد که اضافه کردن مقدار بسیار کمی از پلیمر زانتان می‌تواند اثر مثبت بر فوم‌زایی داشته باشد. مواد پلیمری به‌علت داشتن جرم مولکولی بالا، در غلظت‌های بالاتر، اثر معکوس بر توانایی فوم‌زایی محلول‌های ساخته شده از خود نشان دادند.

آزمون پایداری فوم

بعد از تست های فوم‌زایی، برای مقایسه پایداری فوم‌های ساخته شده از محلول‌ها با ترکیب‌های متفاوت، از نیمه عمر فوم استفاده می‌کنیم. نیمه عمر به‌مدت زمانی گفته می‌شود که حجم فوم به نصف مقدار اولیه خود می‌رسد. برای مقایسه پایداری فوم‌ها، محلول‌های مولد فوم را با غلظت‌های متفاوت در شرایط آزمایشگاهی یکسان (دما و فشار اتمسفریک) ساخته و سپس در دبی ۲۰ mL/min از گاز دی اکسید کربن فوم محلول تشکیل داده می‌شود. ارتفاع اولیه فوم ثبت شده و بعد از گذر زمان مشخص نیمه‌عمر هر کدام از محلول‌ها به‌عنوان شاخص پایداری یادداشت می‌شود. با مقایسه نیمه‌عمر فوم‌ها، به غلظت‌های بهینه از عوامل پایدارکننده فوم خواهیم رسید. شکل ۳ نمودار پایداری محلول‌های مختلف را در شرایط مختلف نشان می‌دهد. ذکر این نکته ضروری است که بعد از پیدا کردن غلظت بحرانی مایسل با استفاده از فوم‌زایی (۰/۲۵٪)، مقدار ۵۰ mL از محلول سورفکتنت را برداشته و در استوانه مدرج ریخته و توسط اسپارژر پارچه‌ای، گاز دی اکسید کربن را با دبی مشخص (۲۰ mL/min) وارد محلول می‌شود. آن‌قدر به فوم‌زایی توسط گاز ادامه داده می‌شود تا ارتفاع فوم به ۲۰۰ mL در استوانه مدرج رسیده و بعد جریان گاز قطع می‌شود.

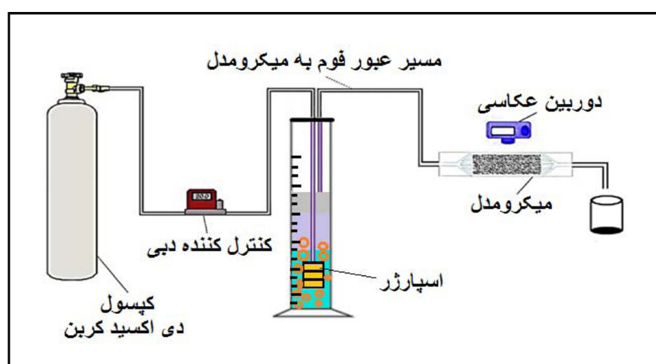


شکل ۳ پایداری محلول‌های طراحی شده در حضور عوامل مختلف

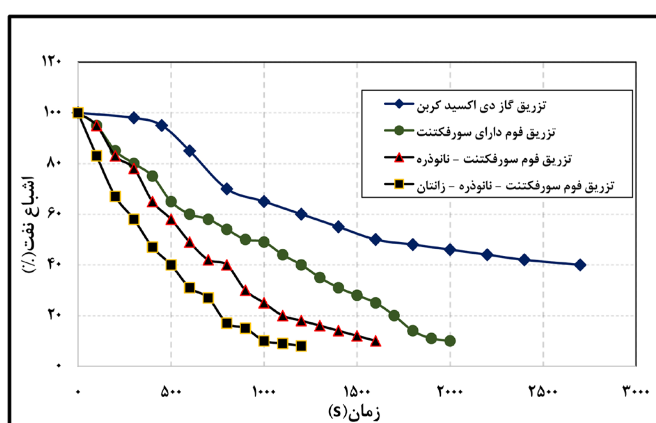
زمان رسیدن ارتفاع فوم به ۱۰۰ mL را به‌عنوان نیمه‌عمر فوم در نظر گرفته و مقیاسی از پایداری حساب خواهد شد. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود اگر عدد ۱۰۰ mL را به‌عنوان حجم نیمه‌عمر در نظر بگیریم، در غلظت بحرانی از سورفکتنت، میزان نیمه عمر ۳۵ min اندازه‌گیری گردید. برای محلول بهینه نانوذره (۰/۰۶٪) و سورفکتنت بالاترین عدد ثبت شده ۴۵ min و میزان پایداری در حضور محلول سورفکتنت، نانوذره و صمغ زانتان ۵۸ min ثبت گردید

آزمون میکرومدل

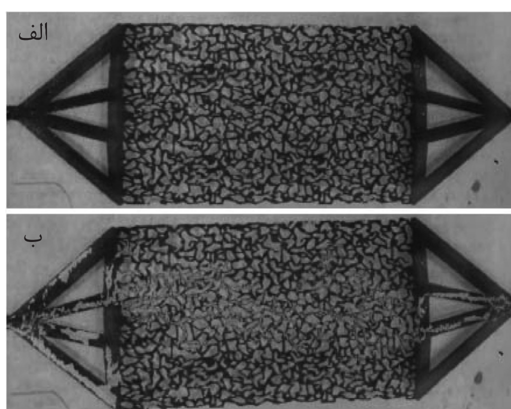
شکل ۴ شماتیک کلی اجزای مورد استفاده برای آزمایش میکرومدل را نشان می‌دهد. به‌منظور انجام آزمون میکرومدل بعد از ساخت میکرومدل شیشه‌ای، ابتدا محیط متخلخل نفت‌دوست می‌گردد. روش کار بدین صورت است که بعد از اشباع میکرومدل با استفاده از هیدروکسید سدیم به‌مدت یک ساعت، محتویات میکرومدل تخلیه شده و کل سیستم با آب مقطر شستشو داده می‌شود. بعد از این مرحله، محیط متخلخل با ۲٪ تری کلرومتیل سیلان و ۹۸٪ تولوئن اشباع شده و سپس با تزریق متانول و جابه‌جایی سیال مرحله قبل، میکرومدل را جهت خشک شدن درون کوره قرار می‌دهند. جهت اطمینان از نفت‌دوست بودن شیشه، آنالیز کشش سطحی انجام شد و زاویه اندازه‌گیری شده ۱۲۸° بود. جهت مقایسه میزان برداشت نفت در سناریوهای مختلف، تست‌های متفاوتی انجام گرفت. نمودار حاصل از نتیجه این تست‌ها به‌طور کامل در شکل ۵ نشان داده شده است. در اولین مرحله از تزریق در میکرومدل، یک آزمون برای مقایسه و تحلیل تزریق فوم در میکرومدل باید داشته باشیم. برای این کار گاز دی اکسید کربن را در میکرومدل اشباع شده از نفت تزریق می کنیم. دبی تزریق گاز ۵ mL/ min در نظر گرفته شده است. نمودار لوزی شکل ۵ میزان اشباع باقی‌مانده نفت را در میکرومدل برای تزریق گاز ساده نشان می‌دهد. همان‌طور که از این نمودار پیداست میزان اشباع نفت باقی‌مانده حتی بعد از گذشت ۲۵۰۰ s دارای مقدار قابل توجهی است. در نمودار تزریق گاز دی اکسید کربن به‌تنهایی، گاز به‌دلیل ویسکوزیته پایین و تمایل به حرکت در منافذ با نفوذ پذیری بالا به سرعت در منافذ بزرگ‌تر حرکت کرده و از راحت‌ترین مسیر، طول میکرومدل را طی خواهد کرد و سریع به منافذ خروجی خواهد رسید. پدیده انگشتی شدن در تزریق گاز سبب می‌شود که گاز در تمام میکرومدل به‌صورت یکنواخت و جبهه پایدار حرکت نکند و نتواند که تمامی نفت در تمام منافذ میکرومدل را تخلیه کند. در شکل ۶ خروج کانال گونه گاز در میکرومدل به‌طور واضح مشخص است.



شکل ۴ شماتیک کلی سامانه آزمایشگاهی میکرومدل جهت تزریق فوم و مشاهده ازدیاد برداشت



شکل ۵ میزان کاهش اشباع نفت در میکرومدل برای سناریوهای مختلف

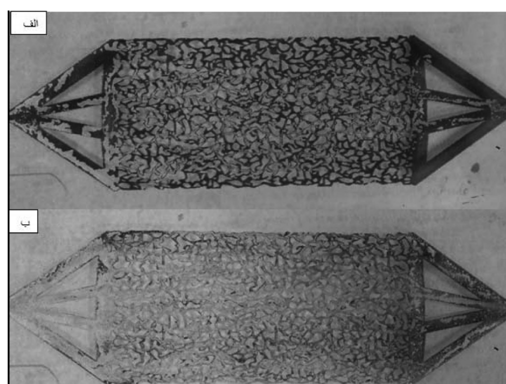


شکل ۶ پدیده انگشتی در سناریوی تزریق گاز به‌تنهایی: الف) میکرومدل قبل از تزریق گاز و ب) میکرومدل بعد از تزریق گاز

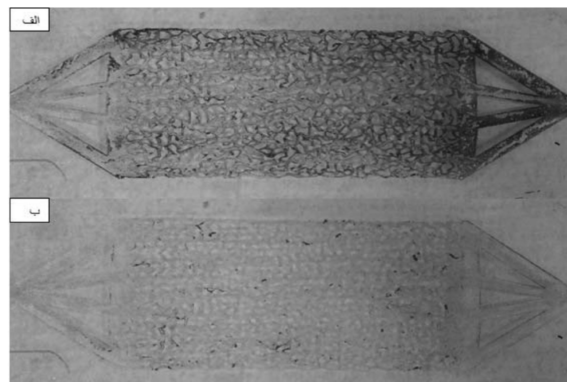
گاز به‌علت تحرک بالا به نسبت نفت موجود در محیط متخلخل سریع به‌سمت دهانه خروجی میکرومدل رفته و به همین علت بازده جاروبی آن کاهش پیدا می‌کند. به همین دلیل میزان تخلیه نفت در این حالت حتی با گذشت زمان طولانی بسیار کمتر از حالتی است که از فوم استفاده می‌کنیم. اگر یک زمان یکسان برای همه آزمایشات تزریق در نظر بگیریم (۱۰۰۰ s برای این پژوهش) و تمامی کاهش اشباع نفت موجود در میکرومدل را باهم مقایسه کنیم خواهیم دید که

پژوهش نفت شماره ۱۲۶، آذر و دی ۱۴۰۱، صفحه ۱۳۶-۱۲۶

برای تزریق گاز دی اکسید کربن به‌تنهایی، میزان تخلیه میکرومدل در حدود ٪۳۵ نفت درجای اولیه است. در مرحله بعدی برای بهبود خواص سیال تزریقی، از فوم ایجاد شده در شرایط بهینه غلظت سورفکتنت استفاده شد که نمودار مثلثی شکل میزان اشباع باقی‌مانده درون محیط متخلخل را برای فوم نشان می‌دهد. در نموداری که از فوم به‌تنهایی و با استفاده از سورفکتنت حاصل شده، میزان نفت جابه‌جا شده در زمان مبنا، حدوداً ٪۵۱ افزایش داشته است. دلیل این مطلب افزایش ویسکوزیته سیال تزریقی است که پدیده انگشتی شدن را تا حدی کاهش می‌دهد. شکل ۷ نشان می‌دهد که در مقایسه با حالت قبلی به‌علت حضور فوم حاوی سورفکتنت کانالیزه شدن سیال تزریقی کاهش پیدا کرده است. دلیل این امر را می‌توان به افزایش قابل توجه ویسکوزیته ظاهری فوم در مقایسه با گاز به‌تنهایی اشاره نمود. حضور سورفکتانت باعث می‌شود که نفت به شکل امولسیون در مایع لاملا تشکیل و همراه با فوم از محیط متخلخل میکرومدل خارج شود. ذکر این نکته ضروری است که در هر مرحله می‌توان با افزایش خواص فوم تزریقی، میزان برداشت نفت از میکرومدل را ارتقا داد. در مرحله سوم از آزمایشات میکرومدل، نانوذره سیلیکا به محلول سورفکتانت در غلظت بهینه اضافه می‌شود. همان‌طور که از نمودار شکل ۵ برای این آزمایش مشاهده می‌شود، میزان اشباع نفت در مقایسه با آزمایش قبل، کاهش پیدا کرده است. براساس شکل نمودار آزمایش، میزان نفت باقی‌مانده در محیط متخلخل بعد از زمان مبنا فقط ٪۲۵ است که افزایش ٪۲۴ به نسبت حالت قبل دارد. حضور نانوذره در ساختار فوم باعث می‌شود که ویسکوزیته محلول سازنده فوم عوض شده و در نتیجه فوم دارای ویسکوزیته ظاهری بیشتری شود. حضور نانوذرات در ساختار سیال تزریقی باعث پایداری بیشتر لاملا از طریق بالارفتن ویسکوزیته مایع و در نهایت بالا رفتن ویسکوزیته لاملا می‌شود. علاوه‌بر این، حضور نانوذره در لایه‌های میانی باعث ایجاد یک مانع محکم‌تر شده که عملاً خروج گاز را سخت‌تر خواهد کرد و به همین دلیل حباب‌ها پایدارتری ایجاد خواهد شد. مرحله نهایی در آزمون میکرومدل تزریق هم‌زمان سورفکتنت، نانوذره و بیوپلیمر زانتان است. نتایج حاصل از این کار در نمودار مربعی شکل ۵ نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود میزان بازده جاروبی حدود ٪۹۰ در زمان مبنای ۱۰۰۰ s است که ٪۱۵ میزان بازده جاروبی را در زمان یکسان به نسبت حالت قبل افزایش داده است. اگر زمان تزریق سیال دارای پلیمر را افزایش دهیم (در حدود ۲۰۰ s بیشتر) میزان برداشت نفت تا حدود ٪۹۳ افزایش پیدا خواهد کرد. شکل ۸ میکرومدل تخلیه شده را در مقایسه با حالت اول که تزریق گاز صورت گرفته بود نشان می‌دهد.



شکل ۷ کاهش پدیده انگشتی شدن در حضور فوم حاوی سورفکتنت و بهبود بازده جاروبی: الف) تزریق گاز به‌تنهایی و ب) تزریق گاز با فوم دارای سورفکتنت



شکل ۸ کاهش پدیده انگشتی شدن در حضور فوم حاوی سورفکتنت، نانوذره و پلیمر و بهبود بازده جاروبی: الف) تزریق گاز به‌تنهایی و ب) تزریق گاز با فوم دارای سه عامل بهبوددهنده فوم

همان‌طور که از این شکل پیدا است تزریق پلیمر به‌همراه نانوذره و سورفکتانت بازده جاروبی بهتری از خود نشان داده است. در تزریق سیال این مرحله علاوه‌بر استفاده از خصوصیات سورفکتنت و نانوذره، از خصوصیات پلیمر زانتان به‌عنوان تکیمل کننده زنجیره پایداری استفاده شده است. در توجیه مکانیسم افزایش برداشت این‌گونه می‌توان ذکر نمود که حضور پلیمر در ساختار فوم علاوه‌بر افزایش ویسکوزیته ظاهری سیال تزریقی، باعث تشکیل یک لاملای قدرت‌مندتر و در نتیجه حباب پایدارتر خواهد شد. حباب‌های تشکیل شده دارای اندازه بزرگ‌تری بوده و زمان ادغام آن‌ها نیز طولانی‌تر خواهد بود. شاید مهم‌ترین دلیل برای افزایش برداشت قابل توجه این باشد که حضور پلیمر در ساختار فوم اثر وجود نفت به‌عنوان عامل مخرب فوم را تا حد زیادی تحت تأثیر قرار می‌دهد. بنابراین با حضور طولانی‌تر حباب در محیط متخلخل اثر تزریق فوم نیز در مدت طولانی‌تری باقی خواهد ماند که از نتایج آن بازده جاروبی بالا است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر عوامل مختلف بر میزان پایداری فوم در شرایط دمایی و فشاری اتمسفری و با استفاده از آب دوبار تقطیر مورد بررسی قرار گرفت. علاوه‌بر آزمایشات استاتیک، سیالات بهینه شده جهت آزمایشات ازدیاد برداشت به‌صورت دینامیک مورد استفاده قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده از این پژوهش به‌صورت خلاصه به‌صورت زیر می‌باشند:

الف) اضافه کردن نانوذره سیلیکا قابلیت فوم‌زایی را افزایش می‌دهد، اما اضافه کردن پلیمر می‌تواند به‌علت افزایش ویسکوزیته قابلیت فوم‌زایی را به‌طور معکوس تحت تأثیر قرار دهد.

ب) پایداری فوم در حضور نانوذره سیلیکا و بیوپلیمر افزایش قابل توجهی پیدا می‌کند. این افزایش پایداری برای حالتی که هر سه پارامتر حضور داشتند، به حدود ۶۰٪ می‌رسد که می‌تواند تأثیر مطلوبی بر بازیابی نفت میکرومدل داشته باشد. این نکته را باید بیان کرد که تأثیر حضور صمغ زانتان در پایداری فوم به مراتب بیشتر از نانوذره سیلیکا است.

ج) تزریق هم‌زمان نانوذره سیلیکا و صمغ زانتان توانایی جاروب‌زنی بهتری از فوم بهبود یافته با نانوذره سیلیکا دارد. این مورد به‌علت افزایش ویسکوزیته ظاهری محلول و عدم ایجاد پدیده انگشتی در میکرومدل است.

مراجع

[1]. Farhadi H, Riahi S (2016) Nanoparticle-surfactant stabilized CO_2 foam for potential mobility control, Journal of Petroleum Research, 26, 95-3: 4-15.
[2]. Babamahmoudi S, Jabaran M H, Riahi S (2017) Experimental investigation of foam stability, improvement by nanoparticle and surfactant in the presence of crude oil, Journal of Petroleum Research, 27, 96-1: 152-163.
[3]. Denkov N D (2004) Mechanisms of foam destruction by oil-based antifoams, Langmuir, 20, 22: 9463.
[4]. Murray B S, Ettelaie R (2004) Foam stability: proteins and nanoparticles, Current Opinion in Colloid and Interface Science, 9, 5: 314-320.
[5]. Zhao J, Torabi F, Yang J (2021) The synergistic role of silica nanoparticle and anionic surfactant on the static and dynamic CO_2 foam stability for enhanced heavy oil recovery: An experimental study, Fuel, 287: 119443.
[6]. Khajehpour M, Etminan R, Goldman J, Wassmuth F, Bryant S (2018) Nanoparticles as foam stabilizer for steam-foam process, SPE Journal, 23, 06: 2232-2242.
[7]. Chipfunhu D, Bournival G, Dickie S, Ata S (2019) Performance characterisation of new frothers for sulphide mineral flotation. Minerals Engineering, 131: 272-279.
[8]. Lv Q, Li Z, Li B, Li S, Sun Q (2015) Study of nanoparticle–surfactant-stabilized foam as a fracturing fluid, Industrial and Engineering Chemistry Research, 54: 9468.
[9]. Yu W, Kanj M Y (2022) Review of foam stability in porous media: The effect of coarsening, Journal of Petroleum Science and Engineering, 208: 109698.
[10]. Monjezi K, Mohammadi M, Khaz›ali A R (2020) Stabilizing CO_2 foams using APTES surface-modified nanosilica: Foamability, foaminess, foam stability, and transport in oil-wet fractured porous media, Journal of Molecular Liquids, 311: 113043.
[11]. Yekeen N, Padmanabhan E, Idris A K (2018) A review of recent advances in foam-based fracturing fluid application in unconventional reservoirs, Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 66: 45-71.
[12]. Zheng C, Cheng Y, Wei Q, Li X. Zhang Z (2017) Suspension of surface-modified nano-SiO_2 in partially hydrolyzed aqueous solution of polyacrylamide for enhanced oil recovery, Colloids and Surfaces A: Physico-Chemical and Engineering Aspects, 524: 169-177.
[13]. Lai N, Tang L, Jia N, Qiao D, Chen J, Wang Y, Zhao X (2019) Feasibility study of applying modified nano-SiO_2 hyperbranched copolymers for enhanced oil recovery in low-mid permeability reservoirs, Polymers, 11, 9: 1483.
[14]. Jia D (2017) CO_2 Foam for heavy oil recovery: stabilization of CO_2 foam by nanoparticle and polymer.
[15]. Rio E, Drenckhan W, Salonen A, Langevin D (2014) Unusually stable liquid foams, Advances in Colloid and Interface Science, 205: 74-86.
[16]. Osei-Bonsu K, Shokri N, Grassia P (2015) Foam stability in the presence and absence of hydrocarbons: From bubble-to bulk-scale, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 481: 514-526.
[17]. Zeng Y, Muthuswamy A, Ma K, Wang L, Farajzadeh R, Puerto M, Hirasaki G J (2016) Insights on foam transport from a texture-implicit local-equilibrium model with an improved parameter estimation algorithm, Industrial and Engineering Chemistry Research, 55, 28: 7819-7829.
[18]. Wang W, Zhang L, Tong S, Li X, Song W (2009) Three-dimensional network films of electrospun copper oxide nanofibers for glucose determination, Biosensors and Bioelectronics, 25, 4: 708-714.
[19]. Koehler S A, Hilgenfeldt S, Stone H A (2000) A generalized view of foam drainage: experiment and theory, Langmuir, 16, 15: 6327-6341.
[20]. Petkova R, Tcholakova S, Denkov N (2012) Foaming and foam stability for mixed polymer–surfactant solutions: effects of surfactant type and polymer charge, Langmuir, 28, 11: 4996-5009.
[21]. Pu W F, Liu R, Li B, Jin F Y, Peng Q, Sun L, Yao F S (2015) Amphoteric hyperbranched polymers with multistimuli-responsive behavior in the application of polymer flooding, RSC Advances, 5, 107: 88002-88013.
[22]. Li D, Xu X, Xu J, Hou W (2011) Poly (ethylene glycol) haired layered double hydroxides as biocompatible nanovehicles: Morphology and dispersity study, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 384, 1-3: 585-591.

بررسی امکان استفاده از پتاسیل کنده‌های حفاری در ساخت بتن به‌منظور کاهش آسیب‌های محیط زیستی

علیرضا لرک[۱*]، بابک امین نژاد[۲] و داریوش عبدی کهنکی[۳]

۱- گروه مهندسی عمران، واحد صفادشت، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۲- گروه مهندسی عمران، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران.

۳- مهندسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد بین الملل کیش، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۱۴

چکیده

از مهم‌ترین نگرانی‌های صنعت حفاری، کاهش اثرات منفی کنده‌های حفاری تولید شده در حین حفاری چاه‌های نفت- گاز است. رشد روزافزون صنعت نفت و افزایش حفر چاه‌های نفت و گاز منجر به تولید مقادیر زیادی از ضایعات حفاری شده است و سالانه میلیون‌ها فوت مکعب از پسماندهای حفاری تولید می‌شود به‌دلیل پیچیدگی، سرعت پایین و هزینه زیاد روش‌های مختلف به‌منظور مدیریت این پسماندها، استفاده از پتانسیل این پسماندها در بخش‌های ساختمانی توجه بسیاری از محققان را به‌خود جلب کرده است. به همین دلیل در این پژوهش، از کنده‌های حفاری در بتن به‌عنوان جایگزینی برای بخشی از سیمان مورد استفاده در صنعت ساختمان، مورد تحقیق وبررسی قرار گرفته است. نوآوری این مطالعه فقط منحصر به تولید یک ماده جدید و مقرون به‌صرفه از کنده‌های حفاری نیست، بلکه کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی نیز است. در این مطالعه، امکان استفاده از کنده‌های حفاری از سازندهای گروه بنگستان که شامل سیلستون (siltston) و سندستون (sandston)، در ساخت بتن به‌عنوان جایگزین بخشی از سیمان موجود در بتن ارزیابی شده است. برای دست‌یابی به این اهداف، مطالعات آزمایشگاهی برای تعیین کمیت مقاومت فشاری نمونه‌های بتن انجام شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که مقدار بهینه در میزان استفاده از کنده‌های حفاری ۲۵٪ است که باعث کاهش ۳۴٪ از مقاومت کلی نمونه‌های بتنی می‌شود. علاوه‌بر این، اثر دو افزودنی خاکستر بادی و دوده سیلیکا بر بهبود مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی حاوی کنده‌های حفاری بررسی شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که افزودن این مواد تأثیر قابل توجهی در افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی حاوی ۲۵٪ از کنده‌های حفاری دارد به‌طوری‌که مقاومت فشاری از دست رفته از ۳۴٪ به کمتر از ۲٪ کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی: کنده‌های حفاری، بتن، خاکستر بادی، دوده سیلیس، مقاومت فشاری، مدیریت ضایعات حفاری، محیط زیست

---

*مسؤول مکاتبات

آدرس الکترونیکی Alireza.lork @iau.ac.ir

شناسه دیجیتال: (DOI:10.22078/PR.2022.4687.3103)

پژوهش نفت شماره ۱۲۶، آذر و دی ۱۴۰۱، صفحه ۱۴۶-۱۳۷

مقدمه

به‌طور کلی ضایعات تولید شده از فعالیت‌های صنعتی آسیب‌های جبران ناپذیری را بر محیط زیست وارد می‌سازد که از جمله آن در صنعت نفت می‌توان به کنده‌های حفاری اشاره کرد که مهم‌ترین زباله تولید شده در هنگام حفاری چاه است. درصورتی‌که کنده‌های حفاری به‌درستی مدیریت نشوند باعث آلودگی شدید خاک و آب‌های زیرزمینی می‌شود [۱ و ۲]. ترکیب کنده‌های حفاری می‌تواند شامل ۳۵-۱۵ ٪ آب؛ ۷۰-۵۰٪ خرده‌های حفاری؛ ۰/۵-۰/۱٪ کلریدها؛ ۶-۴٪ فلزات سنگین؛ ۵-۷٪ افزایه‌های سیال حفاری؛ ۲-۰/۱٪ از نفت و مشتقات نفتی؛ ۱-۰/۱٪ از سایر ترکیبات. کنده‌های حفاری با داشتن عناصر مفید، یکی از نمونه ضایعاتی است که از پتانسیل بالایی برای بازیافت برخوردار است [۵-۳].

ترکیب کانی‌شناسی کنده‌های حفاری به ترکیب سنگ در حال حفاری بستگی دارد و با افزایش عمق چاه، تغییر می‌یابد [۶]. به‌طور کلی، کنده‌های حفاری مخلوطی از خرده‌های اطراف دیواره چاه و ترکیبات گل حفاری است که ممکن است به نفت نیز آلوده باشد. کنده‌های حفاری را می‌توان با استفاده از لرزاننده‌های شیلی، سانتریفیوژها و ... از سایر ترکیبات جدا ساخت [۷]. با وجود شست وشوی کنده‌های حفاری برای جلوگیری از آلودگی خاک و آب‌های زیرزمینی، مدیریت این کنده‌ها به یک نگرانی عمده تبدیل شده است. به همین دلیل در سال‌های اخیر اهمیت پرداختن به کاربردهای بالقوه کنده‌های حفاری در صنعت ساخت افزایش یافته است [۸]. رشد روز افزون صنعت ساخت و همچنین الزام به بازسازی بافت‌های فرسوده و معابر باعث کاهش ذخایر معادن سنگ‌دانه طبیعی شده است. سالانه حدود ۲۵ میلیارد تن بتن در جهان تولید می‌شود [۹] که حجم قابل توجهی از آن بتن سبک است که در تولید مصالح ساختمانی، جداول بتنی، کف‌پوش و دیگر فرآورده‌های پیش ساخته استفاده می‌شود. بررسی امکان استفاده از کنده‌های حفاری در تولید مصالح ساختمانی باعث کاهش مصرف سنگ‌دانه‌ها می‌شود. همچنین با بازیافت کنده‌های حفاری، آلودگی زیست‌محیطی ناشی از دفن این مواد کاهش می‌یابد.

در بحث بررسی سازه‌های بتنی عموما بتن ماده‌ای همگن فرض می‌شود، درحالی‌که بتن شامل اجزای مختلفی مانند خمیر سیمان، سنگ‌دانه شن، ماسه و هوا است. وجود این اجزا در تعیین رفتار بتن اهمیت ویژه‌ای دارد. درمدل‌های اولیه، بتن به‌صورت دو فاز شامل سنگ‌دانه و خمیر سیمان در نظر گرفته می‌شد اما تحقیقات بیانگر وجود یک ناحیه انتقالی در بتن (ناحیه بین خمیر سیمان و سنگ‌دانه) است. در نتیجه بتن را باید ترکیبی متشکل از سه فاز در نظر گرفت که وجود ناحیه انتقالی اثر قابل توجهی بر نفوذپذیری و مقاومت بتن دارد [۱۰].

مطالعات اخیر بیانگر آن است که چنانچه بتنی دارای مقاومت فشاری بالایی باشد، لزوماً در شرایط محیطی بهره‌برداری از دوام بالایی نیز برخوردار نخواهد بود. در واقع، برای طراحی بتن مناسب باید هر دو پارامتر دوام و مقاومت فشاری بتن به‌طور همزمان مد نظر قرار گرفته شود. با توجه به اینکه بتن مهم‌ترین و فراگیرترین ماده ساختمانی است، ضرورت ساخت این ماده بستری مناسب و جذاب را برای محققان در بررسی نقش مواد بازیافتی در بهینه‌سازی تولید و بهبود خواص مکانیکی و پایایی آن فراهم آورده است. در این پژوهش اندازه‌گیری تخلخل برروی برش‌هایی از نمونه‌ها انجام شده است. نمونه‌ها در دمای $5\ ^{\circ}C \pm$ ۱۰۰ تا ثابت شدن وزن نمونه‌ها خشک شده است. سپس نمونه‌ها برای مدت زمان $3\ h$ در دسیکاتور تحت خلا قرار می‌گیرد و توسط آب مقطر به اشباع رسانده می‌شود.

کاهش اثر منفی ضایعات حفاری بر محیط زیست

مطالعات پیشین بیانگر آن است که فعالیت‌های تولید نفت، افزودنی‌های گل حفاری و فلزات سنگین که بخشی از کنده‌های حفاری است از اصلی‌ترین عوامل مخرب محیط زیست است. در مطالعه‌ای اثر منفی هیدروکربن‌های نفتی بر سلامت گیاهان و جانوران به‌دلیل نفوذ این ترکیبات در اندام حیوانات و بافت‌های گیاهی مورد بررسی قرار گرفته است. پس استفاده از گیاهان مقاوم به ترکیبات نفتی می تواند روشی مناسب و کارا و در عین حال ارزان برای کاهش یا تجزیه ترکیبات آلی سمی لجن در خاک باشد [۲۹]. همچنین ورود این ترکیبات به محیط آبزی باعث تغییر پارامترهای فیزیکی و شیمیایی آب می‌شود و تحت تأثیر نور خورشید، تبخیر بخش‌های سبک هیدروکربن‌ها باعث آلودگی محیط زیست می‌شود [۱۲]. در پژوهشی دیگر، اثر منفی ترکیبات شیمیایی فلزات سنگین مانند کلریدها، سولفات‌ها، نیترات‌ها ($CrCl_2$، $MnCl_2$، $CoCl_2$، $NiCl_2$، $ZnCl_2$، $CdCl_2$، $Cu(No_3)_2$ $PbSo_4$) مورد بررسی قرار گرفته است. این ترکیبات به‌خوبی در آب حل می‌شوند و باعث تغییر ترکیب شیمیایی آب و تخریب هیدروسفر می‌شود. در مجموع، به‌دلیل اثرات منفی پیچیده‌ای که این ترکیبات بر انسان و اکوسیستم‌های طبیعی دارد حداقل‌سازی اثرات منفی کنده‌های حفاری بر محیط زیست امری الزامی است [۴]. براساس مطالعات انجام شده، روش‌های مدیریت کنده‌های حفاری به‌صورت سه روش اصلی است: دفن[1]، خنثی‌سازی[2] و بازیافت[3] که از این بین، بازیافت ضایعات روشی پیشرفته‌تر و مقرون به‌صرفه‌تر است [۱۳]. در مطالعات انجام شده، امکان تولید سرامیک شیشه‌ای از کنده‌های حفاری از طریق افزایش دما به ۱۳۰۰ °C و با افزودن سدیم اکسید و کلسیم اکسید مورد بررسی قرار گرفته است. براساس نتایج به‌دست آمده، ماده تولیدی به‌دلیل استحکام و سختی بالا برای استفاده در ساختمان مناسب است [۱۴]. از طرفی دیگر، خاکستر بادی[4] به‌دلیل فرآیند تولید جزو محصولات سبز محسوب می‌شود که جایگزینی آن به‌جای سیمان باعث کاهش آلودگی‌های ناشی از تولید سیمان نیز می‌شود. خاکستر بادی از جمله مواد با ارزش نیروگاه است که حاوی فلزات سنگینی چون آرسنیک، سرب و جیوه است. ترکیب این مواد با آب و محیط زیست آسیب جبران‌ناپذیری را به‌همراه دارد درحالی‌که استفاده از این مواد به‌عنوان افزودنی در ساخت بتن مفید است. استفاده از خاکستر بادی مقرون به‌صرفه است چرا که در کشور ایران به‌دلیل وجود معادن زغال‌سنگ، پتانسیل مناسبی برای تولید این ماده وجود دارد.

مواد آزمایش

سیمان مصرفی در ساخت نمونه‌ها، سیمان پرتلند نوع ۴۲۵-۱ کارخانه سیمان هگمتان می‌باشد. همچنین ماسه عبدی با مدول نرمی برابر ۳/۶۱ و چگالی ظاهری برابر ۲/۶۱ و جذب آب ۰/۵٪ استفاده شده است. شن متوساک با حداکثر اندازه 9/5 mm و چگالی ظاهری ۲/۶۳ و جذب آب ۱/۸٪ استفاده شده است. خاکستر بادی یکی از محصولات جانبی باقی مانده از احتراق زغال‌سنگ پودر شده در نیروگاه‌های حرارتی است می‌باشد که شامل سیلیس (SiO_2)، آلومین (Al_2O_3) و اکسیدهای آهن (Fe_2O_3) و کلسیم (CaO) است. در دهه گذشته، استفاده از این پوزولان به‌عنوان یک ماده افزودنی در بتن افزایش یافته است و خاکستر بادی متداول‌ترین پوزولان مصنوعی می‌باشد [۱۵]. افزودن خاکستر بادی در بتن به‌دلیل حرارت‌زایی کم، باعث کاهش دمای هیدراسیون و افزایش مقاومت فشاری به‌دلیل اثرات پوزولانی[5] می‌شود.

1. 1Burial
2. Neutralization
3. Recycle
4. Flyash
5. Pozzolanic Effects

همچنین ذرات خاکستر بادی به‌دلیل ظاهر کروی شکل و بی‌شکل، نقش مهمی در روانی بتن دارند. خاکستر بادی در انواع C و F وجود دارد. نوع C خاکستر بادی به‌دلیل دارا بودن بیش از ۱۰٪ کلسیم اکسید خاصیت سیمانی شدن نیز دارد. سیمان پرتلند غنی از آهک (CaO) است، درحالی‌که خاکستر بادی حاوی حدود ۲۰٪ آهک است. اگرچه آهک موجود در خاکستر بادی کمتر از سیمان پرتلند است اما عملکرد خاکستر بادی در بتن متأثر از مقدار آهک آن می‌باشد.

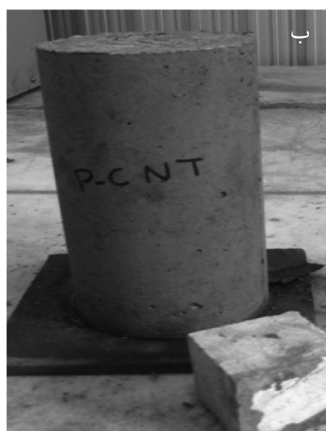
آماده‌سازی نمونه‌ها

ابتدا ماسه و مواد سیمانی به‌مدت 5 min مخلوط می‌شوند. با اضافه کردن سنگ‌دانه درشت عمل اختلاط به‌مدت 9 min دیگر انجام می‌شود. لازم به ذکر است در طرح‌های شامل خاکستر بادی و دوده سیلیسی، از قبل آن را با آب مخلوط نموده و سپس با مخلوط ترکیب شده است. به‌طور کلی نمونه‌های آزمایش شده در ۵ دسته جداگانه از بتن شامل یک نمونه شاهد و ۴ مخلوط حاوی درصدهای مختلف از کنده‌های حفاری، خاکستر بادی، دوده سیلیس و مخلوطی از دوده سیلیس و خاکستر بادی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. کنده‌های حفاری جداشده از محل حفاری (شکل ۱ الف)، ابتدا در گرمخانه با دمای 100 °C به‌مدت 24 h خشک شده و سپس از مش شماره ۱۰۰ عبور داده می‌شود. مخلوط بتن مطابق با استانداردهای ACI طراحی شده است. در این مطالعه از سیمان پرتلند نوع I به‌عنوان ماده سیمانی استفاده شد. کنده‌های حفاری و سیمان به‌طور کامل مخلوط شده و ترکیبی یکنواخت آماده می‌شود. در شکل ۱ ب) بتن در قالب استوانه‌ای به ارتفاع 20 cm (8 inch) و قطر 10 cm (4 inch) ریخته شده است. مقادیر مقاومت گزارش شده نشان دهنده مقاومت متوسط سه نمونه است. نمونه‌ها پس از برداشته شدن از قالب، به‌مدت ۷ روز در دمای اتاق در آب قرار گرفته‌اند. نسبت ترکیب اجزای تشکیل‌دهنده در جدول ۱ نشان داده شده است. برای جبران مقاومت فشاری از دست رفته، درصدهای مختلفی از دوده سیلیس و خاکستر بادی به‌عنوان افزودنی به مخلوط اضافه شده است. همچنین در جدول ۲، اجزای تشکیل‌دهنده نمونه‌ها از قبیل کنده‌های حفاری، خاکستر بادی، دوده سیلیس و خاکستر بادی همراه با توده سیلیس با توجه به غلظت ذرات و مقدار تخلخل بر حسب درصد ذکر شده‌اند.

نتایج آزمایش‌ها

به‌منظور بررسی اثر خرده‌های حفاری بر مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی، مقادیر مختلفی از خرده‌های حفاری با سیمان جایگزین شده است.





شکل ۱ الف) خرده‌های حفاری ب) نمونه بتن تهیه شده

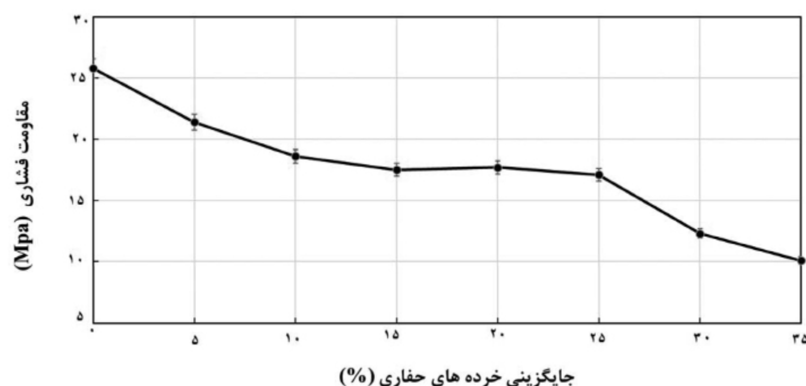
جدول ۱ آنالیز شیمیایی و مشخصات فیزیکی سیمان، خاکستر بادی و دوده سیلیسی

پارامتر	سیمان پرتلند (%.wt)	دوده سیلیسی (%.wt)	خاکستر بادی (%.wt)
SiO_2	۲۲/۱۷	۸۷/۶۳	۶۰/۹
Al_2O_3	۵/۰۱	۰/۶۳	۳/۹۱
Fe_2O_3	۳/۶۷	۱/۲۵	۵/۱۶
CaO	۶۴/۶۹	–	۱۳/۱
MgO	۱/۷۸	–	–
K_2O	۰/۶۷	–	۱/۳۵
Na_2O	۰/۵۱	۰/۹۱	۰/۹۶
SO_3	۲/۷۳	–	۲/۶۷
LOI	۱/۳۶	۲/۶۹	۲/۳۹
C_3S	۵۳/۹۶	–	–
C_2S	۱۰/۱۶	–	–
C_3A	۷/۲۶	–	–
C_4AF	۱۲/۲۷	–	–
P_2O_5	–	–	–
(m^2/kg) Special Surface	۳۲۶	۲۸۳۰۰	۴۱۱

۲- اجزای تشکیل‌دهنده نمونه‌ها

ترکیب سیمان	غلظت ذرات	سیمان پرتلند ۱ (kg/m^3)	آب (kg/m^3)	سنگ‌دانه ریز (kg/m^3)	سنگ‌دانه درشت (kg/m^3)	خرده‌های حفاری (kg/m^3)	دوده سیلیس (kg/m^3)	خاکستر بادی (kg/m^3)	تخلخل (٪)
نمونه شاهد	–	۲۶۸/۵	۱۵۵	۷۴۵	۱۳۰۵	۰	۰	۰	۱۲/۳۸
کنده‌های حفاری	٪۵	۲۵۵	۱۵۵	۷۴۵	۱۳۰۵	۱۳/۴	۰	۰	۱۴/۳۶
	٪۱۰	۲۴۱/۷	۱۵۵	۷۴۵	۱۳۰۵	۲۶/۹	۰	۰	۱۵/۷۹
	٪۱۵	۲۲۸/۲	۱۵۵	۷۴۵	۱۳۰۵	۴۰/۲	۰	۰	–
	٪۲۰	۲۱۴/۸	۱۵۵	۷۴۵	۱۳۰۵	۵۳/۷	۰	۰	–
	٪۲۵	۲۰۱/۴	۱۵۵	۷۴۵	۱۳۰۵	۶۷/۱	۰	۰	–
	٪۳۰	۱۸۸	۱۵۵	۷۴۵	۱۳۰۵	۸۰/۵	۰	۰	–
	٪۳۵	۱۷۴/۵	۱۵۵	۷۴۵	۱۳۰۵	۹۴	۰	۰	–
خاکستر بادی	٪۵	۲۰۱/۴	۱۵۵	۷۴۵	۱۳۰۵	۶۷/۱	۰	۱۰/۰۷	۱۳/۶۰
	٪۱۰	۲۰۱/۴	۱۵۵	۷۴۵	۱۳۰۵	۶۷/۱	۰	۲۰/۱۴	۱۳/۲۳
	٪۱۵	۲۰۱/۴	۱۵۵	۷۴۵	۱۳۰۵	۶۷/۱	۰	۳۰/۲۱	–
	٪۲۰	۲۰۱٫۴	۱۵۵	۷۴۵	۱۳۰۵	۶۷/۱	۰	۴۰/۲۸	–
	٪۲۵	۲۰۱٫۴	۱۵۵	۷۴۵	۱۳۰۵	۶۷/۱	۰	۵۰/۳۵	–
دوده سیلیس	٪۵	۲۰۱٫۴	۱۵۵	۷۴۵	۱۳۰۵	۶۷/۱	۱۰/۰۷	۰	۱۰/۶۳
	٪۱۰	۲۰۱٫۴	۱۵۵	۷۴۵	۱۳۰۵	۶۷/۱	۲۰/۱۴	۰	۱۰/۱۲
	٪۱۵	۲۰۱٫۴	۱۵۵	۷۴۵	۱۳۰۵	۶۷/۱	۳۰/۲۱	۰	–
	٪۲۰	۲۰۱٫۴	۱۵۵	۷۴۵	۱۳۰۵	۶۷/۱	۴۰/۲۸	۰	–
	٪۲۵	۲۰۱٫۴	۱۵۵	۷۴۵	۱۳۰۵	۶۷/۱	۵۰/۳۵	۰	–
خاکستر بادی + دوده سیلیس	٪۵	۲۰۱٫۴	۱۵۵	۷۴۵	۱۳۰۵	۶۷/۱	۵/۰۴	۵٫۰۴	۱۳/۶۵
	٪۱۰	۲۰۱٫۴	۱۵۵	۷۴۵	۱۳۰۵	۶۷/۱	۱۰/۰۷	۱۰/۰۷	۱۱/۷۱
	٪۱۵	۲۰۱٫۴	۱۵۵	۷۴۵	۱۳۰۵	۶۷/۱	۱۵/۱۱	۱۵/۱۱	–
	٪۲۰	۲۰۱/۴	۱۵۵	۷۴۵	۱۳۰۵	۶۷/۱	۲۰/۱۴	۲۰/۱۴	–

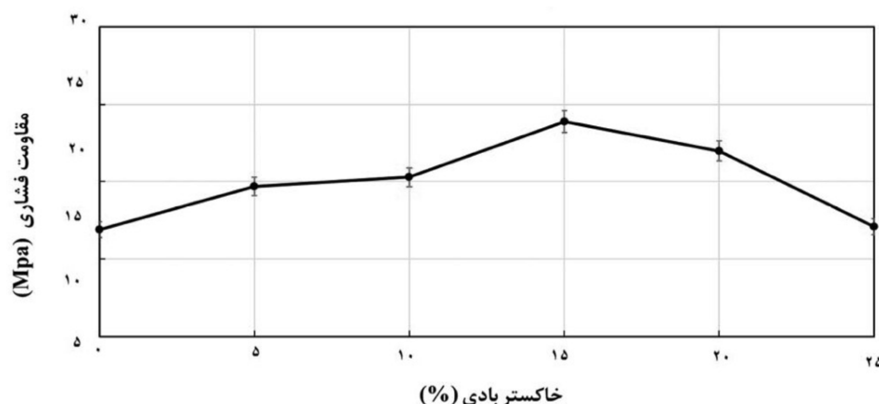
پژوهش نفت شماره ۱۲۶، آذر و دی ۱۴۰۱، صفحه ۱۴۶-۱۳۷



شکل ۲ مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی مقادیر مختلفی از کنده‌های حفاری

شکل ۲ مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی حاوی مقادیر متفاوتی از خرده‌های حفاری را پس از گذشت ۷ روز از عمل‌آوری[1] نشان می‌دهد. میله‌های خطا در شکل انحراف استاندارد را نشان می‌دهد. در مقایسه با نمونه شاهد، نمونه‌های حاوی ۵، ۲۰ و ۳۵٪ از خرده‌های حفاری به‌ترتیب باعث کاهش ۱۷، ۳۱ و ۶۱٪ از مقاومت فشاری نمونه‌ها شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که جایگزینی ۱۵، ۲۰ و ۲۵٪ از سیمان با خرده‌های حفاری تأثیر قابل توجهی بر مقاومت فشاری نمونه‌های تهیه شده ندارد. به‌عبارتی دیگر، استفاده از کنده‌های حفاری به‌میزان ۲۵٪ باعث کاهش ۳۴٪ از مقاومت فشاری می‌شود که به‌عنوان مقدار بهینه گزارش شده است. با هدف بهبود مقاومت فشاری نمونه‌ها، مقادیر مختلفی از خاکستر بادی به نمونه‌های بتنی حاوی ۲۵٪ از کنده‌های حفاری افزوده شده است. به‌طور کلی خاکستر بادی قابلیت کارایی، انسجام و مقاومت نهایی نمونه‌ها را بهبود می‌بخشد [۱۶-۱۷]. همان‌طور که در شکل ۳ نیز مشخص می‌باشد، افزودن خاکستر بادی به بتن باعث افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها شده است. در این آزمایش از مقادیر مختلف خاکستر بادی شامل ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵٪ استفاده شده است که در تمام این نمونه‌های بتنی ۲۵٪ از وزن سیمان با کنده‌های حفاری جایگزین شده است.

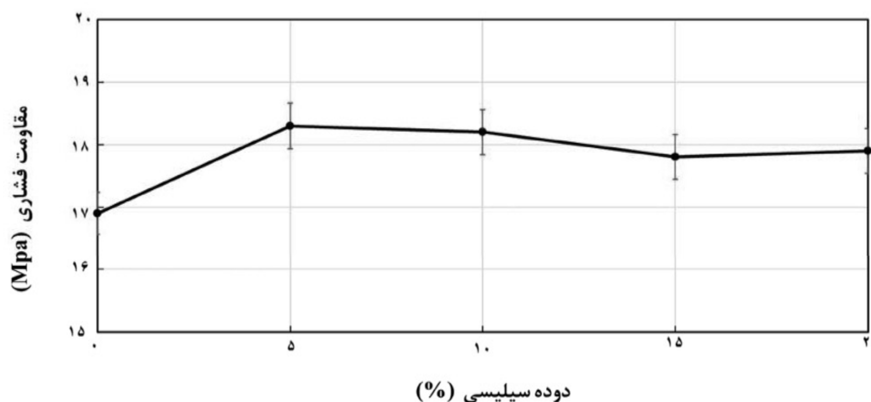
همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود در نمونه‌های بتنی حاوی ۱۵٪ از خاکستر بادی، ۴۱٪ افزایش در مقاومت فشاری نمونه‌ها گزارش شده است.



شکل ۳ مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی مقادیر مختلفی از خاکستر بادی

1. Packing Effect

بـا ایـن حـال، افـزودن ۲۵٪ از خاکسـتر بـادی بـه نمونه‌هـای بتنـی حـاوی ۲۵٪ از کنده‌هـای حفـاری، مقاومـت فشـاری آن‌هـا را به‌طـور قابـل توجهـی کاهـش می‌دهـد. به‌طـور کلـی، مقاومـت فشـاری بتـن حـاوی خاکسـتر بـادی تحـت تأثیـر واکنـش هیدراسـیون، واکنـش پوزولانـی و نحـوه آرایـش ذرات می‌باشـد. واکنش‌هـای هیدراسـیونی (بیـن سـیمان پرتلنـد و آب) و پوزولانـی (بیـن سـیمان پرتلنـد به‌همـراه خاکسـتر و آب) واکنشـی شـیمیایی می‌باشـند امـا اثـر بسـته‌بندی یـک آرایـش مناسـب از ذرات کوچـک اسـت بـه گونـه‌ای کـه بـا کاهـش فضـای حفره‌هـا باعـث افزایـش مقاومـت فشـاری می‌شـود [۱۸-۱۹]. در مراحـل ابتدایـی فرآینـد هیدراسـیون، ذرات خاکسـتر بـادی به‌عنـوان ریزدانه‌هایـی عمـل می‌کننـد کـه باعـث پـر شـدن منافـذ بیـن محصـولات هیدراسـیون می‌شـوند (اثـر بسـته‌بندی) [۲۰]. بـا گذشـت زمـان و وقـوع فرآینـد هیدراسـیون، اثـر شـیمیایی خاکسـتر بـادی نیـز فعـال می‌شـود. در واقـع حضـور سـیمان پرتلنـد و آب در کنـار یکدیگـر منجـر بـه فرآینـد هیدراسـیون می‌شـود و در نتیجـه دو ترکیـب شـیمیایی ایجـاد می‌شـود: هیدروکسـید کلسـیم (CH) [۱] و هیـدرات سـیلیکات روی (CSH) [۲] کـه ایـن تبلـور انـرژی‌زا اسـت. همچنیـن یـک محصـول جانبـی ایـن واکنـش آهـک آزاد[۳] می‌باشـد کـه باعـث کاهـش حجـم منافـذ قابـل دسترسـی در داخـل بتـن می‌شـود. واکنـش پوزولانـی بیـن دوده سـیلیس و CH کـه یـک محصـول هیدراسـیون سـیمان اسـت رخ می‌دهـد و ژل CSH را در بسـیاری از حفره‌هـای اطـراف ذرات سـیمان هیدراتـه شـده ایجـاد می‌کنـد کـه باعـث افزایـش مقاومـت فشـاری بتـن می‌شـود [۲۱-۲۲]. واکنـش پوزولانـی خاکسـتر بـادی بسـیار کندتـر از هیدراسـیون سـیمان می‌باشـد [۲۳]. اسـتفاده از خاکسـتر بـادی علاوه‌بـر صرفه‌جویـی در انـرژی، خصوصیـات بتـن را نیـز بهبـود می‌بخشـد. همچنیـن بـا افـزودن خاکسـتر بـادی، گرمـای هیدراسـیون بتـن کاهـش می‌یابـد [۲۴-۲۵]. شـکل ۴ اثـر دوده سیلیسـی بـر مقاومـت فشـاری نمونه‌هـای بتنـی حـاوی ۲۵٪ از کنده‌هـای حفـاری را نشـان می‌دهـد. غلظت‌هـای مختلفـی از دوده سـیلیس شـامل ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰٪ بـه نمونه‌هـای بتنـی اضافـه شـده اسـت. همان‌طـور کـه در شـکل ۴ نیـز مشـاهده می‌شـود، افـزودن ۵٪ از دوده سـیلیس به‌عنـوان مـاده افزودنـی باعـث افزایـش ۸٪ از مقاومـت فشـاری نمونه‌هـا می‌شـود. نتایـج آزمایشـگاهی بیانگـر آن اسـت کـه افزایـش غلظـت دوده سـیلیس، باعـث افزایـش مقاومـت فشـاری نمونه‌هـا نمی‌شـود.

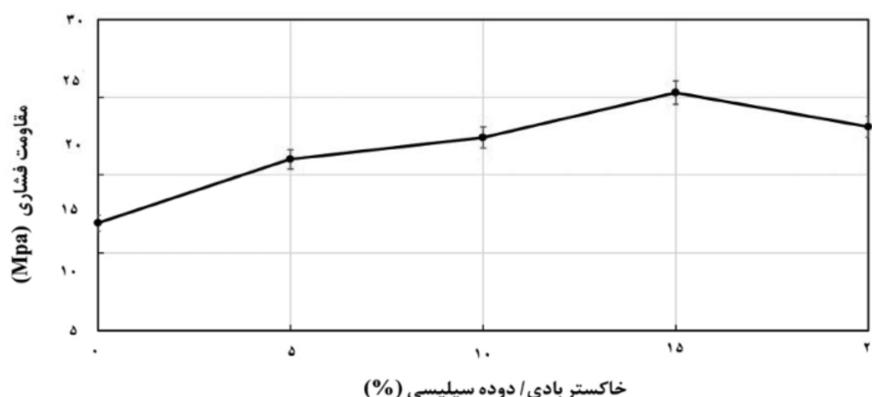


شکل ۴ مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی مقادیر مختلفی از دوده سیلیسی

1. Calcium Hydroxide
2. Zinc Silicate Hydrate
3. Free Lime

پژوهش نفت شماره ۱۲۶، آذر و دی ۱۴۰۱، صفحه ۱۴۶-۱۳۷

همچنین می‌توان اشاره کرد که در بهینه‌ترین حالت، افزودن ۱۵٪ از خاکستر بادی و ۵٪ از دوده سیلیسی به‌ترتیب باعث افزایش ۴۱ و ۸٪ مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ۲۵٪ از کنده‌های حفاری شده است. افزایش مقاومت فشاری در حضور دوده سیلیسی به پیوند سطحی بهبود یافته بین خمیر (ماتریس سیمان هیدراته) و سنگ‌دانه مرتبط می‌باشد. این افزایش مقاومت فشاری به‌دلیل تبدیل هیدروکسید کلسیم به هیدرات سیلیکات کلسیم برروی سطح ذرات سنگ‌دانه است. مطالعات پیشین نیز بیانگر آن است که دوده سیلیس چندان باعث افزایش مقاومت اولیه نمی‌شود ولی مقاومت ثانویه نمونه‌ها (پس از ۷ روز) به‌طور قابل توجه‌ای افزایش می‌یابند [۲۶-۲۷]. همچنین لازم به ذکر می‌باشد که اندازه ذرات دوده سیلیس تا ۱۰۰ برابر کوچک‌تر از سیمان پرتلند معمولی است که این امر باعث افزایش خاصیت لغزندگی و تغییر در ویسکوزیته بتن می‌شود. در نتیجه، حضور دوده سیلیس باعث افزایش رفتار تیکسوتروپیک سیال می‌شود. لیو و همکاران ثابت کردند که خاکستر بادی می‌تواند سیالیت بتن را بهبود ببخشد و با کاهش تخلخل بتن، منقبض شدن بتن را تا حدی کاهش دهد [۲۸]. تخلخل نمونه بتن شاهد برابر ۱۲/۳۸٪ می‌باشد که افزودن ۵٪ از دوده سیلیسی باعث کاهش قابل توجه تخلخل به ۱۰/۶۳ شده است. عملکرد بتن تحت تأثیر عوامل زیادی است. نتایج آزمایش‌های انجام شده بیانگر آن است که افزودن دوده سیلیس و خاکستر بادی به‌طور جداگانه باعث افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های بتن می‌شود. در این آزمایش، اثر حضور ترکیبی این دو افزودنی بر مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی مورد بررسی قرار گرفته است. درصدهای مختلفی از مخلوط خاکستر بادی و دوده سیلیس (به‌عنوان مثال، ۲/۵ ٪ دوده سیلیس و ۲/۵ خاکستر بادی؛ ۵٪ دوده سیلیس و ۵٪ خاکستر بادی) به‌عنوان ماده افزودنی به نمونه‌های تهیه شده اضافه شده است. شکل ۵ اثر افزودن مخلوط خاکستر بادی / دوده سیلیس به نمونه‌های بتنی حاوی ۲۵٪ از کنده‌های حفاری را نشان می‌دهد. در این شکل، با افزایش درصد خاکستر بادی / دوده سیلیکا[1] روند افزایشی در مقاومت فشاری نمونه‌ها مشاهده می‌شود. غلظت ۱۵٪ از افزایه‌ها (۷/۵ ٪ خاکستر بادی/ ۷/۵٪ دوده سیلیس) مقاومت فشاری را تا ۵۰٪ افزایش می‌دهد [۳۰].



شکل ۵ مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی مقادیر مختلفی از ترکیب دو افزایه خاکستر بادی و دوده سیلیسی

1. Silica Fume

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، امکان استفاده از کنده‌های حفاری در ساخت بتن به‌عنوان جایگزین بخشی از سیمان موجود در بتن ارزیابی شده است. بررسی‌های آزمایشگاهی انجام شده نتایج زیر را نشان می‌دهد:

• استفاده از کنده‌های حفاری به‌عنوان جایگزینی برای بخشی از سیمان موجود در بتن منجر به کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها می‌شود. در مقایسه با نمونه‌های شاهد، جایگزینی ۱۵، ۲۰ و ۲۵٪ از سیمان با کنده‌های حفاری، به‌طور میانگین مقاومت فشاری نمونه‌ها را تا ۳۳٪ کاهش می‌دهد. جایگزینی مقادیر بیشتری از سیمان با کنده‌های حفاری، باعث افت شدید مقاومت نمونه‌ها در برابر فشار می‌شود. بنابراین، جایگزینی ۲۵٪ از سیمان با خرده‌های حفاری به‌عنوان بیشترین مقدار مطلوب گزارش شده است.

• برای جبران کاهش مقاومت ناشی از جایگزینی سیمان با خرده‌های حفاری، خاکستر بادی به نمونه‌های بتنی حاوی ۲۵٪ از خرده‌های حفاری اضافه شده است. افزودن خاکستر بادی باعث افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها می‌شود. براساس نتایج آزمایش‌های انجام شده، غلظت بهینه خاکستر بادی ۱۵٪ می‌باشد که منجر به افزایش ۴۱٪ از مقاومت فشاری نمونه‌ها می‌شود. لازم به ذکر است که افزودن بی‌رویه خاکستر بادی، مقاومت فشاری را به‌طور قابل توجهی کاهش می‌دهد.

• بررسی‌های آزمایشگاهی نشان داد که افزودن ۵٪ از دوده سیلیس باعث افزایش ۸٪ از مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی حاوی ۲۵٪ از خرده‌های حفاری می‌شود. با این وجود، افزایش غلظت دوده سیلیس به بیش از ۵٪ باعث بهبود مقاومت فشاری نمونه‌ها نمی‌شود.

• براساس نتایج آزمایشگاهی، حداکثر مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ۲۵٪ از خرده‌های حفاری، با افزودن مخلوطی از خاکستر بادی و دوده سیلیسی بدست آمده است. نتایج نشان می‌دهد که افزودن ۷/۵٪ از خاکستر بادی و ۷/۵٪ از دوده سیلیسی مقاومت فشاری نمونه‌ها را تا ۴۹٪ افزایش می‌دهد. مقاومت فشاری به‌دست آمده در این آزمایش، حدود ۲٪ از مقاومت فشاری نمونه شاهد کمتر می‌باشد درحالی‌که ۲۵٪ از سیمان نمونه‌ها توسط خرده‌های حفاری جایگزین شده است.

سپاس‌گزاری

نویسندگان این مقاله از هم‌فکری تمام اعضای کمیته علمی انجمن مهندسی سازه ایران کمال سپاس‌گزاری را دارند.

مراجع

[1]. Gbadebo A, Taiwo A, Eghele U (2010) Environmental impacts of drilling mud and cutting wastes from the Igbokoda onshore oil wells, Southwestern Nigeria, Indian Journal of Science and Technology, 3, 5: 504-510.
[2]. Sharif M D A, Nagalakshmi N V R, Reddy S, Vasanth G, Sanker K (2017) Drilling waste management and control the effects. J. Adv. Chem. Eng, 7, 166: 10-4172.
[3]. Kujawska J, Pawłowska M, Cel W, Pawłowski A (2016) Potential influence of drill cuttings landfill on groundwater quality—comparison of leaching tests results and groundwater composition, Desalination and Water Treatment, 57, 3: 1409-1419.
[4]. Junttila J, Dijkstra N, Aagaard-Sørensen S (2018) Spreading of drill cuttings and sediment recovery of three exploration wells of different ages, SW Barents Sea, Norway. Marine pollution bulletin, 135: 224-238.
[5]. Vlasov A S, Pugin K G (2021) Development of a method for minimizing the negative environmental impact of drill cuttings by using it as a mineral powder in asphalt concrete, In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1079, 7: 072024, IOP Publishing.
[6]. Liu D S, Wang C Q, Mei X D, Zhang C (2018) Environmental performance, mechanical and microstructure analysis of non-fired bricks containing water-based drilling cuttings of shale gas, Construction and Building Materials,

183: 215-225.
[7]. Rezaei Somee M, Shavandi M, Dastgheib S M M, Amoozegar M A (2018) Bioremediation of oil-based drill cuttings by a halophilic consortium isolated from oil-contaminated saline soil, 3 Biotech, 8, 5: 1-13.
[8]. Hossain M E, Al-Majed A, Adebayo A R, Apaleke A S, Rahman S M (2017) A critical review of drilling waste management towards sustainable solutions, Environmental Engineering and Management Journal (Eemj), 16: 7.
[9]. Chana P (2011) Low carbon cements: the challenges and opportunities, In Proceedings of the Future Cement Conference and Exhibition, 8-9.
[10]. Ramesh G, Sotelino E D, Chen W F (1998) Effect of transition zone on elastic stresses in concrete materials, Journal of Materials in Civil Engineering, 10, 4: 275-282.
[11]. Cabrera J G, Lynsdale C J (1988) A new gas permeameter for measuring the permeability of mortar and concrete, Magazine of Concrete Research, 40, 144: 177-182.
[12]. Li L, Zhou P, Zhang H, Meng X, Li J, Sun T (2017) Mid-temperature deep removal of hydrogen sulfide on rare earth (RE= Ce, La, Sm, Gd) doped ZnO supported on KIT-6: Effect of RE dopants and interaction between active phase and support matrix, Applied Surface Science, 407: 197-208.
[13]. Yagafarova G G, Barahnina V B (2006) Utilizatsiya ekologicheski opasnyih burovyih othodov [Disposal of environmentally hazardous drilling waste], Setevoe Izdanie «Neftegazovoe delo, 1: 1-17.
[14]. Abbe O E, Grimes S M, Fowler G D, Boccaccini A R (2009) Novel sintered glass-ceramics from vitrified oil well drill cuttings, Journal of Materials Science, 44, 16: 4296-4302.
[15]. Ahmaruzzaman M (2010) A review on the utilization of fly ash, Progress in Energy and Combustion Science, 36, 3: 327-363.
[16]. Memon A H, Radin S S, Zain M F M, Trottier J F (2002) Effects of mineral and chemical admixtures on high-strength concrete in seawater, Cement and Concrete Research, 32, 3: 373-377.
[17]. Oner A D N A N, Akyuz S, Yildiz R (2005) An experimental study on strength development of concrete containing fly ash and optimum usage of fly ash in concrete, Cement and Concrete Research, 35, 6: 1165-1171.
[18]. Isaia G C, GASTALDInI A L G, Moraes R (2003) Physical and pozzolanic action of mineral additions on the mechanical strength of high-performance concrete, Cement and Concrete Composites, 25, 1: 69-76.
[19]. Kiattikomol K, Jaturapitakkul C, Tangpagasit J (2000) Effect of insoluble residue on properties of Portland cement, Cement and Concrete Research, 30, 8: 1209-1214.
[20].Wang A, Zhang C, Sun W (2004) Fly ash effects: III. The microaggregate effect of fly ash. Cement and concrete research, 34, 11: 2061-2066.
[21]. Ma W, Brown P W (1997) Hydrothermal reactions of fly ash with $Ca(OH)_2$ and $CaSO_4 \cdot 2H_2O$, Cement and Concrete Research, 27, 8: 1237-1248.
[22]. Qiang W, Mengxiao S, Dengquan W (2016) Contributions of fly ash and ground granulated blast-furnace slag to the early hydration heat of composite binder at different curing temperatures, Advances in Cement Research, 28, 5: 320-327.
[23]. Hanehara S, Tomosawa F, Kobayakawa M, Hwang K (2001) Effects of water/powder ratio, mixing ratio of fly ash, and curing temperature on pozzolanic reaction of fly ash in cement paste, Cement and Concrete Research, 31, 1: 31-39.
[24]. Amnadnua K, Tangchirapat W, Jaturapitakkul C (2013) Strength, water permeability, and heat evolution of high strength concrete made from the mixture of calcium carbide residue and fly ash. Materials and Design, 51: 894-901.
[25]. Han F, Liu R, Wang D, Yan P (2014) Characteristics of the hydration heat evolution of composite binder at different hydrating temperature, Thermochimica Acta, 586: 52-57.
[26]. Behnood A, Ziari H (2008) Effects of silica fume addition and water to cement ratio on the properties of high-strength concrete after exposure to high temperatures, Cement and Concrete Composites, 30, 2: 106-112.
[27]. Poon C S, Kou S C, Lam L (2006) Compressive strength, chloride diffusivity and pore structure of high performance metakaolin and silica fume concrete, Construction and Building Materials, 20, 10: 858-865.
[28]. Liu B, Xie Y, Li J (2005) Influence of steam curing on the compressive strength of concrete containing supplementary cementing materials, Cement and Concrete Research, 35, 5: 994-998.
[29]. Huang X, El-Alawi Y, Donna M, Penrose B, Glick R, Bruce M (2005) A multi-process phytoremediation system for decontamination of persistent total petroleum hydrocarbons (TPHs) from soils, Microchemical Journal, 81: 139–147.
[30]. Heba A, Mohamed. 4 June 2011 . Effect of fly ash and silica fume on compressive strength of self-compacting concrete under different curing conditions, Ain Shams Engineering Journal, 279–86.

راهنمای تهیه مقالات برای چاپ در مجله پژوهش نفت

مجله پژوهش نفت، مقالات علمی و پژوهشی در زمینه‌های مرتبط با صنایع نفت، گاز و پتروشیمی را برای چاپ می‌پذیرد. از پژوهشگران و کارشناسان گرامی که مایل به ارسال مقالات خود هستند، خواهشمندیم به موارد ذیل توجه فرمایند:

مقاله را از طریق وب سایت مجله به آدرس journals.ripi.ir و یا وب سایت پژوهشگاه صنعت نفت به آدرس www.ripi.ir با ثبت نام در سامانه الکترونیکی مجله ارسال نمایید.

مسؤولیت کامل مطالب و منابع چاپ شده بر عهده نویسنده یا نویسندگان خواهد بود و نسخه نهایی مقاله پیش از چاپ به امضاء نویسنده یا نویسندگان می‌رسد. نویسنده یا نویسندگان متعهد خواهند شد که مقالات ارسالی در نشریه دیگری انتشار نیافته است. **(فرم تعهد با امضاء تمام نویسندگان ارسال گردد.)**

مقالات ارسالی عودت داده نمی‌شود.

آئین نگارش فارسی باید به طور کامل رعایت شود و از به‌کار بردن اصطلاحات خارجی که معادل دقیق و پذیرفته شده در زبان فارسی دارند، خودداری شود.

مقاله باید بر روی کاغذ سفید (A4) به صورت یک خط در میان (فاصله سطرها ۱/۲ سانتی متر) توسط نرم افزار Microsoft Word ویرایش ۲۰۰۷ یا ماقبل آن تایپ و حاشیه بالا و پایین ۲/۵ سانتی متر، حاشیه چپ و راست ۲/۵ سانتی متر، لبه بالا ۲/۵ سانتی متر و لبه پایین ۱/۲۷ سانتی متر تنظیم شود.

مقاله باید شامل بخش‌های زیر باشد:

۱. عنوان: باید تا حد امکان کوتاه و کاملاً گویای موضوع مقاله باشد.

نام نویسنده یا نویسندگان باید پس از عنوان مقاله ذکر شود. نویسنده طرف مکاتبات باید با علامت * در کنار نام خود مشخص گردد.

عنوان و آدرس نویسنده یا نویسندگان و پست الکترونیکی نویسنده طرف مکاتبات مشخص شود.

۲. چکیده: باید بین ۱۵۰ تا ۳۰۰ کلمه و شامل هدف از تحقیق، روش کار، مهم‌ترین یافته‌ها و نتیجه‌گیری باشد.

۳. واژه‌های کلیدی: شامل ۳ الی ۶ واژه کلیدی که نکات اصلی در مقاله را معرفی می‌کند.

۴. مقدمه: مقدمه ضمن بیان هدف تحقیق، باید حاوی خلاصه‌ای از اهمیت موضوع، نتایج مطالعات و مشاهدات مرتبط با تحقیق مورد نظر که در گذشته انجام شده است، با ذکر منابع و ماخذهای لازم آن‌ها باشد.

۵. روش کار: در این بخش لازم است روش‌های آزمایشگاهی و مواد مصرفی و تجهیزات مورد استفاده به طور کامل معرفی شود. همچنین چگونگی و روش نمونه‌گیری با دقت بیان شود و آزمون‌های آماری مورد استفاده و مراحل استنتاج آماری به خوبی تشریح گردد.

۶. نتایج و بحث: در برگیرنده نتایج حاصل از تحقیق به صورت متن، جدول، نمودار و تصویر و بحث در خصوص علل پدیده‌ها و مقایسه با یافته‌های مرتبط است.

۷. نتیجه‌گیری: در این بخش یافته‌های حاصل از تحقیق به صورت مختصر و شفاف ارائه می‌گردد.

۸. تشکر و قدردانی: در صورت لزوم از همکاری سازمان‌ها می‌شود.

۹. علائم و نشانه‌ها: فهرست علائم و نشانه‌های مورد استفاده در مقاله به ترتیب حروف الفبا به همراه واحد و شرح آن‌ها ارائه می‌شوند.

۱۰. مراجع: کلیه مراجع مورد استفاده به ترتیب ارجاع آن‌ها در متن، در این بخش ارائه می‌گردند.

۱۱. عنوان، چکیده و واژه‌های کلیدی انگلیسی: این بخش باید در صفحه‌ای جداگانه ارائه شود. تطبیق عنوان و چکیده فارسی با انگلیسی باید مورد توجه قرار گیرد. کلیه نکات مندرج در بند ۱، در ترجمه انگلیسی آن نیز رعایت می‌شود.

لطفاً در تنظیم مقالات، نکات زیر را رعایت فرمایید:

عنوان اصلی مقاله با قلم BZar شماره ۲۴ ضخیم تایپ شود.

عناوین اصلی داخل مقاله با قلم BNazanin شماره ۱۴ ضخیم و عناوین فرعی با قلم BNazanin شماره ۱۲ ضخیم تایپ شوند.

هر تیتر از متن قبلی خود با یک خط فاصله جدا شود.

متن فارسی مقاله با قلم BNazanin شماره ۱۲/۵ نازک و واژه‌ها و متن انگلیسی با قلم Times New Roman شماره ۱۰ نازک تایپ شود.

عنوان جداول و شکل‌ها با قلم BNazanin شماره ۱۱ ضخیم تایپ گردد. عنوان جداول در بالا و عنوان شکل‌ها در پایین آن‌ها نوشته می‌شود.

محتوای فارسی جداول با قلم BNazanin شماره ۱۱ نازک و عبارات انگلیسی جداول با قلم Times New Roman شماره ۹ نازک تایپ شود.

کلیه اعداد باید به‌صورت فارسی تایپ شوند.
واحد تمامی اعداد باید در سیستم SI باشد.
کلیه فرمول‌ها باید به ترتیب شماره‌گذاری شده و با استفاده از نرم‌افزار MathType تهیه شوند.
کلیه جداول و شکل‌ها در انتهای مقاله ارائه گردد. هر جدول یا شکل در یک صفحه جداگانه ارائه شود. همچنین فایل اصلی مقاله شامل متن اصلی، چکیده فارسی و لاتین، جداول و تصاویر (بدون نام نویسندگان) نیز ارسال گردد.
کلیه جداول فارسی و راست چین باشد.
کلیه شکل‌ها باید به‌صورت سیاه و سفید و کاملاً واضح ارائه شوند.
از تکرار داده‌ها به صورت چندگانه (جدول و نمودار و ...) خودداری فرمایید.
اگر شکل یا جدولی از مرجع دیگر اخذ شده باشد، شماره مرجع در انتهای عنوان شکل یا جدول درج و مشخصات آن به منابع اضافه شود.
شکل‌های مقالات به صورت فایل اصلی (در همان نرم‌افزاری که توسط آن تهیه شده‌اند مانند Excel و غیره) ارسال شود.
از به‌کار بردن واژه‌های انگلیسی در متن مقاله خودداری شود. معادل انگلیسی کلمات فارسی و نام نویسنده (گان) که برای نخستین بار در مقاله به‌کار می‌رود، به صورت زیرنویس در صفحه مربوط درج گردد. زیرنویس‌ها در هر صفحه با گذاردن شماره فارسی در گوشه بالای آخرین حرف از کلمه، در متن مشخص شوند.
در بخش چکیده نباید ارجاعی به معادلات و یا مراجع مقاله داده شود.
کلیه مراجع ذکر شده در بخش مراجع باید در متن مقاله مورد ارجاع قرار گرفته باشند. شماره‌گذاری مراجع در متن در داخل کروشه صورت می‌گیرد.
-تعداد صفحات مقاله به صورت خام (بدون قالب‌بندی) حداکثر ۱۵ صفحه تهیه گردد.

ارائه مراجع بر اساس الگوی زیر صورت می‌گیرد:
-کتاب و گزارش فارسی و خارجی:
نام خانوادگی حرف اول نام نویسنده یا نویسندگان (سال انتشار) نام کتاب، ذکر نام فصل یا فصل‌های کتاب (درصورت مطالعه و استفاده از یک یا چند فصل کتاب)، نام کتاب، شماره ویرایش کتاب، ناشر، شماره صفحات.
مثال:

1. Barrow GM (1984) Physical chemistry, (4th ed.), McGraw-Hill Inc., 1-127.

2. Spellman FR (2010) Problems facing water and wastewater treatment, Spellman's standard handbook for wastewater operators, 1st ed., Crc Press, 9-32.

3. Spellman FR (2010) Problems facing water and wastewater treatment (Chapter 1), Spellman's standard handbook for wastewater operators, 1st ed., Crc Press, 9-32.

-مقاله فارسی:
نام خانوادگی حرف اول نام نویسنده یا نویسندگان (سال) عنوان مقاله، نام مجله به طور کامل، دوره مجله، شماره مجله: شماره صفحات.
مثال‌ها:
۴. صفایی م.، قاسمی م. ر. و میرحبیبی ع. (۱۳۸۴) ساخت و بررسی ریز ساختاری پایه‌های کاتالیستی کلسیم آلومینات، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، ۲۴، ۲: صفحات ۱۸ - ۹.
۵. زینل‌زاده ا.، رضایی م. ر. و کمالی م ر (۱۳۹۲) استفاده از مدلسازی یک بعدی حوضه در مطالعه سیستم نفتی: مثالی از سنگ‌های منشا کژدمی و پابده در جنوب فروافتادگی دزفول، پژوهش‌های چینه‌نگاری و رسوب‌شناسی، ۲۹: ۱۱۹-۱۰۷.
- مقاله خارجی: نام خانوادگی حرف اول نام نویسنده یا نویسندگان (سال انتشار) عنوان مقاله، نام کامل مجله، دوره مجله، شماره مجله: شماره صفحات.
مثال‌ها:

6. Wang L, Sunden B (2003) Optimal design of plate heat exchangers with and without pressure drop specifications, Applied Thermal Engineering, 23: 295-311.

7. Qiu Z, Zou C (2020) Controlling factors on the formation and distribution of "sweet-spot areas" of marine gas shales in South China and a preliminary discussion on unconventional petroleum sedimentology, Journal of Asian Earth Sciences,

194, 1: 103989-103992.
8. Soltani B, Beiranvand B, Moussavi-Harami R, Honarmand J, Taati F (2020) Facies analysis and depositional setting of the upper pliocene akchagyl formation in southeastern caspian basin, NE Iran, Carbonates and Evaporites, 35, 8: 1-18.
9. Rögl F (1999) Mediterranean and Paratethys, Facts and hypothesis of an Oligocene to Miocene paleogeography (short review), Geologica Carpathica, 50, 4: 339-349.
10. Robert Alexandra MM, Letouzey J, Kavoosi MA, Sherkati S (2014) Structural evolution of the Kopeh Dagh fold-and-thrust belt (NE Iran) and interactions with the South Caspian Sea Basin and Amu Darya Basin, Marine and Petroleum Geology, Elsevier, 57: 68–87.

- مجموعه مقالات کنفرانس‌ها:

نام خانوادگی حرف اول نام نویسنده یا نویسندگان (سال برگزاری کنفرانس) عنوان مقاله، عنوان کنفرانس، محل برگزاری کنفرانس، شماره صفحات.

مثال:

۱۱. شکری قلعه س.، زرین پاشنه س. و سلطانیه م. (۱۳۷۹) مدل‌سازی و شبیه‌سازی راکتورهای چند فازی برای گوگردزدایی از سوخت دیزل، پنجمین کنگره ملی و چهارمین کنگره بین‌المللی مهندسی شیمی، دانشگاه شیراز، ایران.
12. Al-Thani J, Faisal F, Tony M (2005) Risk and uncertainty modeling in the oil and gas industry, Middle East Oil and Gas Show and Conference, Society of Petroleum Engineers (SPE), Bahrain.

- مقاله حاصل از کتب:

نام خانوادگی حرف اول نام نویسنده یا نویسندگان مقاله)سال انتشار(، عنوان مقاله، عنوان کتاب، ناشر، شماره صفحات.

13. Lee DH, Kim HI, Kim SS (2004) Surface modification of polymeric membranes by UV grafting, Advanced materials for membrane separations, American Chemical Society, 281-299.

- کتب:

نام خانوادگی حرف اول نام نویسنده یا نویسندگان مقاله)سال انتشار(،عنوان کتاب، ناشر، شماره صفحات.

۱۴. آقانباتی ع. (۱۳۸۳) انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ۵۸۶-۱.

- پایان‌نامه: نام خانوادگی حرف اول نام نویسنده (سال) عنوان پایان‌نامه، نوع پایان‌نامه، دانشگاه، کشور، شماره صفحات (در صورت امکان).

مثال:

۱۵. ابراهیمی ه (۱۳۸۳) مدل‌سازی راکتورهای ریفرمینگ متان توسط بخار آب از نوع حرارت از بالا، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی سهند، ایران، ۷۱-۱.
۱۶. نبوی ج. (۱۳۸۳) گوگردزدایی بیولوژیکی زغال سنگ طبس، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران، ۴۸-۱۳.

-پایان‌نامه چاپ‌شده به زبان انگلیسی:

Author(s) (year) Title, Degree level, University/Institute, location, pp. .

17. Mack S. (2000) Desperate optimism, MA thesis, University of Calgary, Canada, 1-82.

- ثبت اختراع: نام خانوادگی حرف اول نام مخترع یا مخترعان (سال) عنوان اختراع، نوع و شماره ثبت اختراع.

مثال:

18. Baker F S (1998) Highly microporous carbon, U.S. Patent: 5710092.

- منابع اینترنتی: نام خانوادگی حرف اول نام نویسنده یا نویسندگان (سال) عنوان، آدرس سایت.

مثال:

19. Arps J, Lanning B, Dearnaley G (2007) Maximizing a potentially significant energy source, http://www.swri.org/3pubs/ttoday/spring06/energy.html.

توجه: در بخش مراجع (References) به هیچ وجه ممکن لغت یا عبارت غیره یا بقیه نویسندگان یا "et al" به‌هیچ وجه ذکر نگردد.

توجه: در بخش مراجع مقاله و بخش چکیده تفصیلی هر مقاله ، خواهشمند است که به تعدادی از مقالات چاپ شده در مجله پژوهش نفت اشاره گردد.

فونت تمامی مراجع که به زبان انگلیسی نگارش می گردد می‌بایست Times New Roman 10 Regular باشد.

در بخش چکیده تفصیلی (Extended Abstract) فونت ها باید به صورت ذیل باشند:

بخش چکیده تفصیلی (Extended Abstract)	Font size and type
موضوع مقاله (Topic)	Times New Roman 14 Regular and Bold
نام و نام خانوادگی نویسندگان	Times New Roman 10 Regular and Bold
افیلیشن نویسندگان	Times New Roman 9 Regular and Italic
ایمیل نویسنده یا نویسندگان مسئول	Times New Roman 9 Regular
لغت Abstract	Times New Roman 10 Regular and Bold
متن Abstract	Times New Roman 10 Regular
لغت Keywords	Times New Roman 10 Italic and Bold
لغات Keywords	Times New Roman 10 Regular
لغت Introduction	Times New Roman 10 Regular and Bold
متن Introduction	Times New Roman 10 Regular
لغت Geological settings (در صورت نیاز)	Times New Roman 10 Regular and Bold
متن Geological settings (در صورت نیاز)	Times New Roman 10 Regular
لغت Materials and methods	Times New Roman 10 Regular and Bold
متن Materials and methods	Times New Roman 10 Regular
لغت Results and discussion	Times New Roman 10 Regular and Bold
متن Results and discussion	Times New Roman 10 Regular
لغت Conclusions	Times New Roman 10 Regular and Bold
متن Conclusions	Times New Roman 10 Regular
لغت Acknowledgment (در صورت نیاز)	Times New Roman 10 Regular and Bold
متن Acknowledgment (در صورت نیاز)	Times New Roman 10 Regular
لغت Nomenclatures (در صورت نیاز)	Times New Roman 10 Regular and Bold
متن Nomenclatures (در صورت نیاز)	Times New Roman 10 Regular
لغت References	Times New Roman 10 Regular and Bold
متن References	Times New Roman 10 Regular
لغت (Appendixes)	Times New Roman 10 Regular and Bold
متن (Appendixes)	Times New Roman 10 Regular
تعداد صفحات (با در نظر گرفتن شکلها و جداول)	Research Article: Maximum 5 pages including figures and tables Review Article: Maximum 9 pages including figures and tables Short communication Article (Research note): Maximum 3 pages including figures and tables
لغت Table	Times New Roman 9 Regular and Bold
متن بیانکننده جدول	Times New Roman 9 Regular
لغات، عبارات، واحدها درون هر سلول از جداول	Times New Roman 9 Regular
لغت Fig.	Times New Roman 9 Regular and Bold
متن بیان کننده شکل	Times New Roman 9 Regular
مراجع درون متن (in-text citations)	Times New Roman 10 Regular (e.g. [1], [1,2-5], or [3,7])

Feasibility Study of the Potential Use of Drilling Cuttings in Concrete to Reduce Environmental Damage

Alireza Lork[1]*, Babak Amin Nejad[2] and Dariuosh Abdi Kohanaki[3]
1. Department of Civil Engineering, Safadasht Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
2. Department of Civil Engineering, Roudehen Branch, Islamic Azad University, Roudehen, Iran
3. Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Kish International Branch, Kish
Alireza.lork @iau.ac.ir
DOI:10.22078/PR.2022.4687.3103

Received: December/23/2021 Accepted: November/15/2022

Abstract

One of the most important concerns of the drilling industry is reducing the negative impacts of drilling cuttings of oil-gas wells. The increasing growth of the oil industry and drilling of oil and gas wells led to large amounts of drilling waste. In this study, drilling cuttings in concrete as a substitute for part of the cement used in the construction industry has been investigated. In this study, the possibility of using drilling cuttings of formations of Bangistan group, including siltstone and sandstone, in concrete production has been evaluated as a substitute for part of the cement in concrete. For this purpose, laboratory studies have been conducted to quantify the compressive strength of concrete samples. The optimum use of drilling cuttings is 25%, which it reduces the total strength of concrete samples by 34%. In addition, the effect of air ash and silica fume additives on improving the compressive strength of concrete samples containing drilling cuttings has been investigated. The test results showed that the addition of these materials had a significant effect on increasing the compressive strength of concrete samples containing 25% of drilling cuttings so that the lost compressive strength is reduced from 34% to less than 2%.

Keywords: Drilling Cuttings, Concrete, Fly Ash, Silica Fume, Compressive Strength, Drilling Waste Management, Environmental Impacts.

Laboratory Investigation of Foam Stability Enhancement using Nanoparticles, Surfactant and Xanthan Biopolymer to Enhance Oil Recovery

Rohallah Hashemi* and Hamidreza Salehi
Department of Chemical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran
rhashemi@iut.ac.ir
DOI:10.22078/PR.2022.4622.3180

Received: August/09/2022 Accepted: September/10/2022

Abstract

The growing demand of the world for energy has caused to exploit the non-renewable resources using best techniques to enhance the recovery. Gas injection is one of the most common techniques in the exploitation of reservoir's hydrocarbon. In addition, carbon dioxide is used widely for gas injection processes in oil reservoirs due to the good results obtained by executing numerous field projects. It should be noted that there exist problems in the process of gas injection into reservoirs. Low density and viscosity of gas is caused unfavorable movement of gas in the porous environment as well as early gas breakthrough in production wells. These factors cause gravitational separation as well as fingering phenomenon in reservoirs. To reduce gas injection problems, foam is replaced instead of gas as injecting material. Implementing the foam injection techniques would result better sweeping efficiency than solely gas flooding since foam has a higher apparent viscosity than gas. Fingering and early breakthrough of gas are reduced by foam injection in oilfields. In this research, by using deionized water at atmospheric temperature and pressure, in the first step, the foaming ability of the designed solutions was investigated. At a critical concentration of 0.24% (weight percent of surfactant), the effect of various parameters on the foaming ability were investigated. In addition, the stability of these solutions were measured based on the foam half-life and the optimal parameters of the different solution were determined to be injected into the micromodel. At the end, the solution obtained from the optimal parameters was prepared for running the injection scenarios. Then the amount of produced oil for different solutions was evaluated by micromodel experiments. It should be stated that presence of silica nanoparticles increased the half-life of the foam by about 25%. In addition, adding the Xanthan gum polymer to injecting foam structure along with the silica nanoparticle increased foam half-life to about 60%.

Keywords: EOR, Foaming Ability, Carbon Dioxide, Foam Stability, Xanthan, Micromodel.

Petroleum Research, 2023(December-January), Vol. 32, No. 126

Reservoir Characterization by Applying Pressure Transient Analysis on Data Obtained from Electrical Submersible Pumps

Yasin Khalili1, Yousef Rafiei* and Mohammad Sharifi

Department of Petroleum Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

y.rafiei@aut.ac.ir

DOI:10.22078/PR.2022.4816.3158

Received: May/23/2022 Accepted: August/22/2022

Abstract

Nowadays, oil companies should minimize the cost of oil and gas production. This is where the concept of well and reservoir monitoring and management can be vital for oil companies. Performing pressure transient analysis is an effective way to evaluate the dynamic behavior of wells and reservoirs, as it has a larger radius of investigation than other methods, but these tests such as drill stem tests are costly and they are carried out at regular intervals and require special equipment. On the other hand, there is great attention to the use of artificial lift methods, especially the use of electrical submersible pumps in Iranian production fields and wells, to maintain the optimal production rate. These pumps are equipped with sensors and gauges that by using the potential of these sensors and checking the monitoring data, it is easier to analyze the pressure transient tests and check the dynamic performance of the well and reservoir. These sensors, which are installed in a unit called the downhole monitoring equipment under the electrical motor of the pump, record parameters such as intake pressure, discharge pressure, intake temperature, discharge temperature, etc. We can investigate the dynamic behavior of the well and reservoir in a certain period by analyzing the intake pressure versus time. This paper aims to use the data monitored by an electrical submersible pump from one of the southwestern fields of Iran and using the well-testing approach, so the dynamic behavior of the well and the reservoir are analyzed, and the key indicators and the performance of the well and the reservoir are examined and evaluated. After that, the result was compared with the information obtained from the drill stem test analysis. By observing a very small percentage difference of about less than 8% between the results of the drill stem test and the electrical submersible pump test obtained, we can realize the usefulness of this approach.

Keywords: Monitoring, Electrical Submersible Pump, Reservoir Management, Dynamic Behavior of the Well and the Reservoir, Pressure Transient Analysis.

Numerical Simulation of Two-Phase Flow of CO_2 -Oil in Pore-Scale at Near-Miscible Condition Using Computational Fluid Dynamic Technique

Parisa Behnoud[1], Mohammad Reza Khorsand Movaghar[1]* and Mostafa Keshavarz Moraveji[2]
1. Department of Petroleum Engineering, Amir Kabir University of technology, Tehran, Iran
2. Department of Chemical Engineering, Amir Kabir University of Technology, Tehran, Iran
m.khorsand@aut.ac.ir
DOI:10.22078/PR.2022.4973.3217

Received: November/19/2022 Accepted: December/10/2022

Abstract

Carbon dioxide (CO_2) gas flooding has long been regarded as a popular method of improving oil recovery as it can reduce the carbon footprint in the atmosphere through carbon storage and CO_2 sequestration. Miscible flooding is considered the most efficient way to reach the maximum oil recovery factor. However, not only do not all oil reservoirs experience pressures above miscibility but also due to difficulty in retaining reservoir pressure in the desired region, numerous miscible flooding operations experience pressure decline below minimum miscibility pressure (MMP). In these circumstances, a near-miscible process seems to be attainable and practical compared with a miscible injection. In the current study, we exclusively focus on pore-scale near-miscible CO_2-oil displacement. In this regard, the effective near-miscible region is determined based on the available criteria in the literature. Then at the lower-pressure limit of the defined near-miscible region, Phase-Field coupled with the Navier-Stokes equation as the numerical approach is implemented to investigate the CO_2-Oil displacement by capturing the diffusive interface properties and hydrodynamic properties of fluids. Quantitative analysis of results, to better realize the pore-scale mechanism of oil recovery demonstrated that if the pressure conditions are maintained throughout the modeling in the effective near-miscible pressure region, almost significant amounts of by-passed oil in the pores from small to large to be recovered and the oil recovery increased from 50% to more than 90% approaching the results of miscible gas injection. This outcome can accentuate the significance of near-miscible CO_2-EOR in operation applications.

Keywords: CO_2 Storage, Near-miscible Region, Enhanced Oil Recovery, Pore-scale Model, Phase Field.

Petroleum Research, 2023(December-January), Vol. 32, No. 126

Pore-scale Reconstruction of Tight Reservoirs Using Generative Adversarial Networks

Ali Karimi and Saeid Sadeghnejad*
Department of Petroleum Engineering, Faculty of Chemical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
sadeghnejad@modares.ac.ir
DOI:10.22078/PR.2022.4843.3165

Received: June/27/2022 Accepted: September/26/2022

Abstract

A significant amount of Iranian hydrocarbon resources is produced from fractured reservoirs with tight rock matrices. The structure of pores in these reservoirs is so complex. Very tiny pores and throats in nanometer sizes are responsible for reserving hydrocarbons. By understanding the structure of porous media and examining fluid flow inside these nanometer pores, we can better understand the porous media›s behaviour on larger scales. Investigating fluid flow in reservoir rocks requires three-dimensional structures with appropriate accuracy. However, using conventional methods to reconstruct a porous medium is expensive. On the other hand, as these structures become more complex, the ability of these methods to reconstruct pore network models decreases significantly. In recent years, with the advance in computer science, especially artificial intelligence, a new gate has been opened for reconstructing complex structures such as tight reservoir rocks. By implementing machine learning methods, three-dimensional pore-scale models can be created with high accuracy. The petrophysical properties of rocks can be calculated from them. One of these methods is the generative adversarial network (GAN), which has proven to reconstruct the pore structure of rocks. This study uses a GAN with convolutional layers to reconstruct the images obtained from FIB-SEM of a tight reservoir rock at the pore scale. Different realizations of the pore space are reconstructed by the trained GAN. The porosity and permeability of the reconstructed images are very close to the properties in the actual FIB-SEM image and have a deviation of 1.07% and 5.24%, respectively. It can be seen that GANs have a high capacity in rock reconstruction at the pore scale, especially for tight reservoirs.

Keywords: Image Reconstruction, Pore Network Modelling, Generative Adversarial Networks, Tight Reservoir Rock.

Investigation of Sedimentation and Subsidence Rates in Gorgan Plain Using Basin Modeling

Arsalan Zeinalzadeh*, Javad Honarmand, Somayeh Parham and Katayoon Rezaeeparto
Geology Faculty, Research Institute of Petroleum Industry (RIPI), Tehran, Iran
zeinalzadeha@ripi.ir
DOI:10.22078/PR.2022.4804.3156

Received: May/22/2022 Accepted: September/13/2022

Abstract

The Gorgan Plain is located in the north of Iran and has mud volcanoes and high-pressure zones. There is limited information on Miocene and older sediments in this area and the available data on the Pliocene and younger sediments do not provide a complete understanding of the geology of these areas. The absence of marker fossils in the sediments has led to ambiguities in age determination and study of layers expansion in the study area. The Cenozoic sediments of Gorgan Plain which include Paleocene-Miocene sediments and Cheleken (Lower Pliocene), Akchagyl (Upper Pliocene), Apsheron (Lower Pleistocene), Baku (Upper Pleistocene) and Neo-Caspian (Holocene) formations, are mainly composed of sandstone and mudstone. This study shows that the thick Pliocene-Present sediments of Gorgan Plain were deposited at high rates, which was simultaneous with the increase in orogenic activity in the region and the gradual separation of the South Caspian Basin from open waters and the change of the sedimentary environment from marine to fluvial-deltaic. Sedimentation rates of Cenozoic deposits increase towards the coastal parts of the Gorgan Plain. The lowest sedimentation rates are in the Paleocene-Eocene deposits, and the highest rates are in the Baku Formation. High sedimentation rate is one of the controlling factors in the formation of mud volcanos and high-pressure zones in the region, and these rates can have a significant impact on the processes and elements of the petroleum system.

Keywords: Basin Modeling, Sedimentation Rate, Subsidence Rate, Cenozoic Sediments, Gorgan Plain.

Petroleum Research, 2023(December-January), Vol. 32, No. 126

Identification of Fractures in Kangan and Dalan Formations Using the Integration of FMI Log and Seismic Attributes

Ehsan Golmohammadi[1], Ali Moradzadeh[1], Abolfazl Abdolahipour[1], Reza Mohebian[1]*, Shervin Bahramali Asadi[2]

1. School of Mining Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Iran

2. Petrophysics Department, Kish Petroleum Engineering Services Company, Tehran, Iran

mohebian @ut.ac.ir

DOI:10.22078/PR.2022.4806.3154

Received: May/16/2022 Accepted: August/10/2022

Abstract

One of the significant challenges in studying the oil and gas fields is assessing the fractured reservoirs. The existence of such fractures plays a crucial role in productivity and the amount of final offtake from hydrocarbon reservoirs, specifically, in carbonate formation. Hence, presenting a practical method in the identification and determination of fractures intensity is necessary. Image log tools are the first informative references in studying the fractured reservoir by which geologists can identify the details of layers, faults, fractures, and lithological status. FMI (Fullbore formation microimager) image logs are powerful tools in identifying fractures in wellbore surroundings. FMI image logs are indirect images with high resolution from wellbores. This study aims to employ the FMI image logs and optimal seismic attributes in assessing the fracture distribution in the field that we are about to study. To reach the target, 3D post-stack seismic data and FMI image log data of three wells (A, B, and C) that existed in the field are deployed. Two out of three wells (A and B) are utilized for determination and identification, and the third well (C) is utilized for validation which such identifications are carried out by “Geolog” software. As a result, fractures were identified in well A with a total of 152 open and closed fractures with a general trend of northeast-southwest, in well B with a total of 235 open and closed fractures with a general trend of north-south, and zones with high fracture density were determined. Therefore, with the usage of optimal seismic attributes in the “Hampson Russell”, the fracture density in the whole field was determined. Moreover, by using the distribution of fracture density, the field faults were determined. The results show that using the integration of FMI Image logs and seismic attributes is a practical method in studying and assessing the fracture distribution in fractured reservoirs.

Keywords: Fractured Reservoirs, Fractures, Faults, FMI Image Log, Fracture Density, Seismic Attributes.

Main Oil Pump Equipment Repair Time Prediction with Fuzzy Logic and Adaptive Neuro Fuzzy System and Availability Assessment and Their Related Indices with Monte Carlo Simulation in Power Generation Systems

Danesh Mirzaei[1], Ali Behbahaninia[2*], Ashkan Abdalisousan[1,3] and Seyed Mohammadreza Miri Lavasani[1]

1. Department of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2. Department of Energy Systems Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

3. Department of Engineering and Technology, Astara Branch, Islamic Azad University, Astara, Iran

alibehbahaninia@kntu.ac.ir

DOI:10.22078/PR.2022.4769.3140

Received: May/03/2022 Accepted: June/23/2022

Abstract

Equipment failure, repairs and maintenance play a decisive role in the availability of the entire system. This study presents a practical solution for analyzing equipment repairs and maintenance time and predicting equipment behavior. Expert experience has been used to estimate failure time and equipment repair time; therefore, this study has focused on estimating the repair time and repair rate of equipping the main lubricating oil pump in the gas turbine power generation system with the approach of entering human experience (HE). In the next step, an analysis of the Equipment›s Annual Availability Forecast is performed over a period of 20 years, thus, the critical years of the equipment are determined in terms of downtime by evaluating and reviewing the annual availability. For this purpose, a database of human knowledge and experience has been simulated to estimate the repair times used using fuzzy logic, and the whole process of repair times has been simulated by designing a neural-fuzzy system; which is used to estimate and predict equipment repair time. Then, the annual availability, time-dependent repair rate and other availability indicators are calculated using the Monte Carlo simulation method. The target model is the main lubricating oil pump system of the gas turbine unit of Abadan refinery in Iran. According to the results, applying preventive repairs at optimal intervals of 150 to 160 days, has a significant effect on increasing the availability of equipment and leads to a reduction in additional periodic inspections. Also, the minimum and the maximum system availability is predicted to be 96% and 99%, respectively.

Keywords: Uzzy Logic, Adaptive Neural Fuzzy System, Membership Function, Availability, Reliability, Repair Rate.

Petroleum Research, 2023(December-January), Vol. 32, No. 126

Laboratory Investigation of the Effect of Pre-existing Crack on Hydraulic Fracturing Using Acoustic Emission

Ali Esmaeilzadeh[1], Majid Nikkhah[1]* and Hamed Shirazi[2]

1. Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran
2. Faculty of Engineering, Department of Mining Engineering, Velayat University, Iranshahr, Iran

m.nikkhah@shahroodut.ac.ir
DOI:10.22078/PR.2022.4800.3151

Received: May/17/2022 Accepted: October/08/2022

Abstract

Hydraulic fracturing is used as one of the most common methods of enhanced recovery oil and gas wells for the production of unconventional reservoirs as well as more production in reservoirs. Determining the direction of fracture propagation and the geometry of the fracture network created by the hydraulic fracturing process plays an important role in increasing the permeability of the reservoir. In this research, in order to better understand the mechanism of formation and expansion of cracks in the process of hydraulic fracturing, acoustic emission (AE) has been used. Experiments were performed on concrete block specimens under true triaxial stress conditions and acoustic emission monitoring was performed simultaneously with the injection of fluid into the specimen. In order to investigate the crack deflection behaviors in the hydraulic fracturing process and the effect of natural fractures on the formation, pre-cracked specimens have been used. The results of this study show the pre-manufactured crack reduce the fracture pressure of the specimens and the magnitude of the difference in horizontal stresses during the experiments clearly affects the crack propagation path during the hydraulic fracturing process. Acoustic emission monitoring during hydraulic fracturing experiments is a useful result, and answer in the analysis of the hydraulic fracturing process and the analysis of acoustic emission data show that the type of cracks created are often tensile cracks.

Keywords: Hydraulic Fracturing, Acoustic Emission, True Triaxial Stress, Pre-manufactured Crack, Enhanced Recovery

Permeability Estimation and its Simulation to Determine the Reservoir Characteristics of Shurijeh Formation in One of the Reservoirs of Northeast Iran

Milad Moradi[1], Hossain Rahimpour-bonab[1] and Ali Kadkhodaie[2*]

1. School of Geology, College of Science, University of Tehran, Iran

2. Earth Sciences Department, Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

kadkhodaie_ali@tabrizu.ac.ir

DOI:10.22078/PR.2022.4660.3094

Received: November/29/2021 Accepted: February/17/2022

Abstract

Permeability is one of the most important parameters in hydrocarbon reservoirs. It is beneficial to have a correct understanding of the permeability and its distribution in the production management process. Due to the limitations, the coring process is performed on a small number of wells in the field, while most of the wells are subjected to well logging operations. Therefore, finding a way to estimate the characteristics of the reservoir by well-logging and modeling it on the field is a valuable technique. Therefore, in this study, the multilayer perceptron artificial neural network method (error back propagation) has been used to estimate the permeability of different parts of the Shurijeh Formation in the Kopeh Dagh sedimentary basin. Sonic logs, neutrons, density and the results of the formation evaluation, including porosity and saturation of useful water as input layer, and permeability data from core well analysis of two wells as output layer cells, were used to train the network. After training the network with the data of these two wells, the core analysis data of another well was used to test the network, which in the network test stage, a correlation coefficient of 98% for permeability was obtained. With the help of this neural network, permeability was estimated for other wells in the field that no core data were obtained from. After estimating the permeability using neural network, its distribution and expansion were determined using Sequential Gaussian Simulation algorithm (SGS) in the field scale. According to the obtained model, the sandstone areas, which are mainly in zones B and D, are separated as reservoir areas and also the central and northwestern areas of the field, due to the higher average permeability, are areas prone to further excavations of the field.

Keywords: Shurijeh Formation, Kopet-Dagh, Well Loging, Multilayer-perceptron Artificial Neural Network (MLP_ANN), Sequential Gaussian Simulation (SGS).

PETROLEUM
RESEARCH
2023 (December-January)● Volume 32 ● No. 126

Contents:

PETROLEUM RESEARCH

2023(December-January)• Volume 32 • No. 126



Director in Charge: J. Towfighi
Editor in Chief: M. R. Ehsani
Executive Manager: T. Moradian
Assistant Editor: F. Rahmani
Administration Office: N. Deldar, and P. N. Noori
***Publishing, Lithography, and Binding Company*:** Ganjineh-ye Miniator Publisher

Address:
Research Institute of Petroleum Industry (RIPI)
P.O. Box: 14665-137, Tehran, Iran
Tel: (+98 21) 4825 2129, 4825 3263
Fax: (+98 21) 4473 9712
Website: www.ripi.ir